

Anne Karhunen

Työmaatilojen energiankulutuksen vähentäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Sähkötekniikka
Insinöörityö
20.5.2011

Alkulause

Tämä insinöörityö tehtiin Skanska Rakennuskone Oy:lle. Haluan kiittää koko yritystä insinöörityöksi tarjotusta mielenkiintoisesta aiheesta. Lisäksi haluan kiittää kehityspäällikkö Tommi Lyytistä sekä muita työkavereita, joilta olen saanut tukea lopputyöni tekemisessä.

Helsingissä 20.5.2011

Anne Karhunen

Tekijä Otsikko	Anne Karhunen Työmaatilojen energiankulutuksen vähentäminen
Sivumäärä Aika	36 sivua + 4 liitettä 20.5.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori Heimo Valtonen kehityspäällikkö, dipl.ins. Tommi Lyytinen
<p>Tässä insinööriyössä perehdyttiin työmaatilojen energiankulutukseen ja tutkittiin niiden energiatehokkuuden parantamisen mahdollisuuksia. Energiatehokkuuden parannuskeinoin rajattiin kolme tapaa: työmaatilojen rakenteiden eristeet, ilmalämpöpumpun käyttö sekä aurinkopaneelit.</p> <p>Aluksi selvitettiin, mihin sähköenergiaa yleensä kuluu työmaatiloissa. Seuraavaksi perehdyttiin teoriaan kehityskohtien taustalla. Selvitettiin eristeiden lämmönjohtavuuden taustalla olevaa fysiikkaa ja yhtälöitä, joiden avulla asioiden ymmärtäminen helpottuu. Lisäksi perehdyttiin myös ilmalämpöpumpun sekä aurinkopaneelien toimintaan.</p> <p>Seuraavaksi tutkittiin työmaatilojen sähkökulutusta erään työmaan todellisten sähkönkulutustietojen perusteella. Sähkönkulutustietojen perusteella voitiin tutkia työmaatilankulutusta sähkömäärä ja verrata työmaatilojen kulutusta työmaan kulutukseen.</p> <p>Työmaatilojen eristeiden vaikutuksista tarvittavaan lämmitysenergian määrään oli olemassa tutkimustietoa ja mittaustuloksia, joten näillä päästiin tutkimaan todellisia eroja eri eristeiden välillä ja niiden vaikutusta sähkönkulutukseen.</p> <p>Alussa todettiin, että vaikka ilmalämpöpumppuja on ollut työmaatiloissa jo jonkin aikaa, mitään mittaustuloksia ei ollut saatavilla. Näin ollen päädyttiin tekemään laskennallinen malli, josta pystyttäisiin näkemään mahdolliset energiasäästöt tai -häviöt. Aurinkopaneeleista oli olemassa testi, jonka todettiin epäonnistuneen osittain. Näin ollen varsinaisia mittaustuloksia ei ollut saatavilla aurinkopaneelien tuottamasta energiasta. Lopuksi päädyttiin tekemään myös aurinkopaneeleista laskennallinen malli, jotta pystyttäisiin toteamaan sen ominaisuudet työmaatilojen energiatehokkuuden parantamisessa.</p> <p>Työssä todettiin lämmöneristeiden vaikuttavan lämmityskulutukseen ja ilmalämpöpumpun säästävän energiaa. Tutkittu aurinkosähköjärjestelmä ei sellaisenaan sovellu hyvin työmaatilakäyttöön.</p>	
Avainsanat	työmaatila, sähkönkulutus, energiankulutus, lämmöneristys, ilmalämpöpumppu, aurinkopaneeli, sähkönsäästö

Author Title	Anne Karhunen Energy Consumption Reduction of Site Cabins
Number of Pages Date	36 pages + 4 appendices 20 May 2011
Degree	Bachelor in engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Heimo Valtonen, Senior Lecturer Tommi Lyytinen, M.Sc, Development Manager
<p>The purpose of this study was to explore the energy consumption of site cabins and the possibilities for their energy efficiency improvement. The aim was to study three predefined ways for improving energy efficiency including heat insulation of site cabin structures, usage of air heating unit and solar cell panels.</p> <p>This study begins with an analysis of electricity consumption in a site cabin. It also describes theories behind energy efficiency improvement and deals with the physics of heat insulation and principles of air heating unit and solar cell panels.</p> <p>This work studies the energy consumption of site cabins based on the measurements obtained from the energy company. On the grounds of the measurements the electricity consumption of one cabin was studied. Also the site cabin's electricity consumption was compared to the entire site's consumption.</p> <p>The differences between different kinds of heat insulation materials were studied based on actual measurements. The aim was to get results of the real differences between insulation materials and to see how these differences affect the heating consumption of the site cabin.</p> <p>Even though site cabins have had air heating units for a long time already no actual measurements were available. Therefore in this thesis a calculated model about an air heating units was made. The goal was to see the impact on the heating consumption of the site cabin. Finally, also a calculated model about solar cell panels was made. Solar cell panels had been tested on one construction site but the test had failed. The acquired solar cell system information was used in the calculated model.</p> <p>The results of this thesis show that insulation materials affect electricity consumption and the usage of air heating unit saves electricity. The solar cell system explored in this study is not very well compatible as such with the use of site cabins.</p>	
Keywords	site cabin, electricity consumption, energy consumption, heat insulation, air heating unit, solar cell panel, electricity saving

Sisällys

Alkulause

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Työmaatilojen käyttö rakennustyömaalla	2
2.1	Työmaatilojen käytettävyys ja rakenne	2
2.2	Sähkönkulutus työmaatiloissa	3
3	Työmaatilojen energiatehokkuuden parantaminen	4
3.1	Työmaatilojen lämmöneristys	4
3.1.1	Käsitteiden määritelmät	4
3.1.2	Eistemateriaalit	6
3.1.3	Työmaatilojen ovet ja ikkunat	7
3.2	Ilmalämpöpumppu	8
3.2.1	Ilmalämpöpumpun toimintaperiaate	8
3.2.2	Ilmalämpöpumppu lämmityskäytössä	9
3.2.3	Ilmalämpöpumppu jäähdytyskäytössä	10
3.2.4	Ilmalämpöpumpun lämpö- ja jäähdytyskerroin	11
3.3	Aurinkosähköpaneelien toimintaperiaate	11
4	Työmaan sähkönkulutustietojen vertailu	13
4.1	Työmaan lähtötiedot	13
4.2	Työmaatilaryhmän sähkönkulutus	14
4.3	Sähkönkulutuksen vertailu ja kustannukset	18
5	Eristeiden vaikutus lämmityskulutuksessa	20
5.1	Lämmöneristevertailun lähtötiedot	20
5.2	Vertailutilojen U-arvot ja lämmöneristevertailun tulokset	21
6	Ilmalämpöpumpun laskennallinen malli	23
6.1	Laskennan tarvittavat lähtötiedot	23
6.2	Ilmalämpöpumpun lämmitysenergiesäästö työmaatilaryhmässä	24

7	Aurinkosähköpaneelien laskennallinen malli	30
7.1	Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus	30
7.2	Aurinkosähköjärjestelmän sähkön tuotto	31
8	Yhteenveto	35
9	Lähteet	36

Liitteet

Liite 1. Työmaatilojen rakenteet

Liite 2. Vertailutilojen U-arvojen laskenta

Liite 3. Ilmalämpöpumpun tekniset tiedot

Liite 4. Kulutuslaitteiden tehoja

1 Johdanto

Työmaatilat muodostavat rakennustyömaan henkilöstölle toimisto-, neuvottelu- ja sosiaalitalat. Tiloissa tulee olla tarvittava varustus töiden turvallisuuden ja sujuvuuden kannalta. Näistä syistä työmaatiloja kannattaa ja pitää kehittää. Työmaatilat ovat työmaalla kuitenkin pidempään kuin muu kalusto. Työmaatilojen kehittämisellä tässä yhteydessä tarkoitetaan niiden energiatehokkuuden kehittämistä.

Tässä insinöörityössä tutkitaan työmaatilojen energiankulutusta työmaatilán rakenteen kautta, työmaatilojen sähkönkulutusta työmaan sähkönkulutustietojen perusteella sekä ilmalämpöpumpun vaikutusta työmaatilojen energiatehokkuuteen. Lisäksi tutkitaan aurinkopaneelien käyttömahdollisuutta ja mahdollista energiansäästöä todellisen testin perustalta.

Työmaatiloille on tehty tutkimuksia, joissa verrataan erilaisten ja eripaksuisten eristeiden vaikutusta lämmitykseen tarvittavaan energiamäärään. Työssä tutkitaan ja verrataan kahta erilaista työmaatilaa tehtyjen tutkimusten ja niiden antamien tuloksien perusteella.

Vaikka ilmalämpöpumput ovat olleet markkinoilla jo monta vuotta ja työmaatiloissakin käytössä jo jonkin aikaa, varsinaisia mittauksia niiden vaikutuksista ei ole tehty. Työssä tehdään laskennallinen malli ilmalämpöpumpun vaikutuksista lämmitysenergian kulu-
tukseen.

Aurinkosähköpaneelikehityksen taustalla on erään työmaan testi, jossa aurinkopaneelilla oli tarkoitus tuottaa työmaatilojen valaistuksen tarvitsema sähköenergia. Tämä testi kuitenkin osittain epäonnistui, ja varsinaisia tuloksia ei saatu lainkaan. Työssä esitetään aurinkopaneeleille laskennallinen malli, jossa pyritään todentamaan paneeleista saatava energiamäärä ja pohditaan, miten aurinkoenergiaa voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää työmaatiloissa.

Vertailtaviin tilojen rakenteiden suurin ero on lämpöeristemateriaalissa. Liitteessä 1 esitetään vertailtaviin työmaatilojen seinien, kattojen ja lattioiden rakenteet ja käytetyt materiaalit. Vertailtaviin työmaatilojen A ja B ulko- ja sisämitat myös poikkeavat toisistaan. Taulukossa 1 esitetään vertailutilojen ulko- ja sisämitat, pinta-alat sekä tilavuudet.

Taulukko 1. Vertailutilojen sisä- ja ulkomitat

		Vertailutila A	Vertailutila B
Ulkomitat	Pituus / m	6,2	7,2
	Leveys / m	3,4	3,3
	Korkeus / m	3,0	2,8
Sisämitat	Pituus / m	5,9	7,0
	Leveys / m	3,1	3,1
	Korkeus / m	2,4	2,4
Pinta-ala / m ²		18,3	21,7
Rakennuspinta-ala / m ²		73,1	85,2
Tilavuus / m ³		43,9	52,1

Taulukon 1 rakennuspinta-alalla tarkoitetaan työmaatilain seinärakenteiden, lattian ja katon yhteenlaskettua pinta-alaa, ja pinta-alalla tarkoitetaan lattiapinta-alaa. Rakennuspinta-alaan ei lasketa mukaan ovien ja ikkunoiden aloja.

2.2 Sähkönkulutus työmaatiloissa

Kaikissa työmaatiloissa valaistus on toteutettu pääsääntöisesti loisteputkivalaisimilla. Muutamassa tilassa on lisäksi käytetty energiansäästölampulla varustettuja pienempiä kattovalaisimia. Niin ikään lämmitys on toteutettu sähkölämmittimillä, joiden tehot vaihtelevat 800–1 200 W. Lisäksi varusteina on myös 3 kW sähkölämmitin kuivaushuoneessa, kuivauskaappeja (2 kW) sekä lämminvesivaraajia kooltaan 15–300 l (1–3 kW) työmaatilasta riippuen. Lisäksi tiloissa, jotka sisältävät tulevan veden sekä viemäroinnin putkistoja, on asennettu itsesäätyvä saattolämmityskaapelointi (10–20 W/m) putkien jäätyksen estämiseksi.

Työmaalla työmaatiloihin lisätään tarvittavat kulutuslaitteet. Toimistotiloissa käytettyjä laitteita ovat tietokoneet, tulostimet, skannerit ja modeemit. Ruokailu- ja taukotiloissa käytettyjä laitteita ovat kahvinkeitin, jääkaappi sekä mikroaaltouuni. Nämä yhdessä työmaatiloin kiinteiden sähkölaitteiden kanssa muodostavat kokonaissähkönkulutuksen.

Muutaman viime vuoden aikana työmaatiloissa on yleistynyt ilmalämpöpumppujen käyttö. Suurin syy niiden kysyntään ja käyttöön on ollut tilojen jäähdyttämisen tarve. Tämä vaikuttaa osaltaan työmaatilojen kuluttamaan sähkön määrään. Ilmalämpöpumpun järkevällä käytöllä saadaan talvella sähkönkulutuksessa säästöä aikaan. Kesäisin työmaatiloja ei juuri tarvitse lämmittää sähkölämmittimillä, jolloin jäähdytyskäytössä oleva ilmalämpöpumppu lisää sähkönkulutusta.

Lisäksi kokeilussa on ollut työmaatilan katolle asennettavat aurinkopaneelit. Tällä on pyritty ympäristöystävällisempään sähkönkulutukseen. Aurinkopaneeliratkaisujen kehittyminen mahdollistaa aurinkoenergian hyödynnettävyyden myös rakennustyömaalla.

3 Työmaatilojen energiatehokkuuden parantaminen

Työmaatilojen käyttövoimana toimii sähkö. Pelkkää työmaatilaa ajateltaessa parhaiten sähkönkulutuksen pienentämiseen voidaan vaikuttaa lämmityskustannuksia pienentämällä. Tämä onnistuu eristystä parantamalla sekä ilmalämpöpumpun käytöllä. Aurinkoenergiaratkaisuja kehittämällä osa työmaatilojen varusteiden vaatimasta sähköstä, voidaan tulevaisuudessa korvata aurinkoenergialla.

3.1 Työmaatilojen lämmöneristys

Eristämisellä ja rakenteiden materiaalivalinnoilla vaikutetaan lämmön siirtymiskykyyn usean materiaalikerroksen läpi. Eristämisestä puhuttaessa yleisiä käsitteitä ovat pintavastus, ainekerroksen lämmönvastus ja lämmönjohtavuus sekä aineen lämmönläpäisykerroin.

3.1.1 Käsitteiden määritelmät

Pintavastus ilmoittaa ainekerroksen lämmönsiirtymisvastuksen. Lämmönsiirtymisvastus kuvaa lämmön siirtymiskykyä ainekerroksen pinnalta ympäristöön tai ympäristöstä pinnalle. Pintojen lämmönvastuksille käytetään taulukoituja laskenta-arvoja, koska pinnan lämmönvastukseen vaikuttavan aineen lämmönsiirtymiskerroin ei ole pinnalle

ominainen. Pinnan lämmönsiirtymiskertoimeen vaikuttaa muun muassa ilman virtausnopeus, virtauksen luonne, pinnan asento ja laatu, ja lämpötila.

Ainekerroksen lämmönvastukseen vaikuttaa vastaavan aineen lämmönsiirtymiskerroin h , joka saadaan yhtälöllä:

$$h = \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

missä λ on ainekerroksen lämmönjohtavuus ja d sen paksuus. Aineen lämmönsiirtymiskerroin kertoo rakenneainekerroksen läpi siirtyvän lämpötehon pinta-alayksikköä ja kerroksen rajapintojen välistä asteen lämpötilaeroa kohti. Ainekerroksen lämmönvastus saadaan ainekerroksen lämmönsiirtymiskertoimen käänteisarvona:

$$R = \frac{1}{h} = \frac{d}{\lambda}. \quad (2)$$

Rakenneainekerroksen lämmönvastus R kertoo kerroksen lämmöneristyskyvystä. Yhtälöstä 2 voidaan havaita, että mitä pienempi ainekerroksen lämmönsiirtymiskerroin h on eli mitä vähemmän lämpöä pääsee siirtymään kerroksen läpi, sitä parempi ainekerroksen lämmöneristyskyky on.

Lämmönjohtavuus ilmoittaa lämpövirran tiheyden jatkuvuustilassa pituusyksikön paksuisen tasa-aineisen ainekerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen [2, s. 2].

Eri aineiden lämmönjohtavuusarvoista on olemassa taulukoita, joista arvoja käytetään lämmönvastuksien määrittämiseen. Edellä mainittujen tietojen perusteella pystytään laskemaan seinämälle lämmönläpäisykerroin eli U -arvo. U -arvo kertoo seinämän läpi siirtyvän lämpötehon pinta-alayksikköä ja asteen lämpötilaeroa kohti. Seinämän lämmönläpäisykerroin saadaan seinämän lämmönvastuksen käänteisarvona:

$$U = \frac{1}{R_T}, \quad (3)$$

missä R_T on seinämän tai rakennusosan ainekerrosten kokonaislämmönvastus. Mitä suurempi rakennusosan kokonaislämmönvastus on, sitä pienempi on rakennusosan lämmönläpäisykerroin. Mitä pienempi lämmönläpäisykerroin on, sitä vähemmän rakennusosa päästää lämpöä lävitseen neliötä kohden.

Rakennusosan kokonaislämmönvastus saadaan siis laskemalla rakennusosan ainekerrosten lämmönvastukset yhteen. Lisäksi kokonaislämmönvastukseen otetaan huomioon rakennusosassa olevan ilmakerroksen lämmönvastus R_g , maan lämmönvastus R_b sekä sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen summa $R_{si} + R_{se}$. Ohuet ainekerrokset R_q , kuten esimerkiksi muovikalvot, käsitellään erillään muista ainekerroksista, ja niillekin on olemassa taulukoituja arvoja. [2, s. 467–471; 3.]

3.1.2 Eistemateriaalit

Eistemateriaaleja on paljon ja erilaisten käyttötarkoitusten mukaan kehitettyjä. Työssä vertailtavissa työmaatiloiissa on käytetty kahta erilaista lämmöneristettä: mineraalivillaa ja polyuretaania.

Mineraalivilloista yleisimmät ovat kivivilla ja lasivilla. Mineraalivillaeristeet muodostuvat epäorgaanisesta kuidusta ja orgaanisesta sideaineesta. Niiden lämmöneristävyys perustuu sen huokoiseen rakenteeseen ja paikalla pysyvän ilman alhaiseen lämmönjohtavuuteen. Mineraalivillojen lisäaineet ovat palavia, mutta kuituaine on palamatonta. Mineraalivillan ilmanläpäisevyysarvo riippuu sen tiheydestä. Mitä tiheämpää eristeaine on, sitä vähemmän se läpäisee ilmaa. Kovissa mineraalivilloissa ei tarvita erillistä tuulensuojaa, mutta pehmeitä mineraalivillaeristeitä käytettäessä on kuitenkin käytettävä myös tuulensuojausta.

Mineraalivillan vesihöyrynläpäisevyys on melko suuri. Rakenteissa onkin käytettävä höyrynsulkua eristeen lämpimämmällä puolella, ellei kosteuden poistumista lämmöneristeestä ulospäin voida muuten varmistaa. Kosteuspitoisuus vaikuttaa lämmöneristyskykyyn siten, että kosteuspitoisuuden kasvaessa villan lämmöneristyskyky heikkenee. Mineraalivillaeristeet eivät kuitenkaan lahoa tai mätäne, vaan niissä voi esiintyä sieni- ja homekasvustoa epäsuotuisien kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden takia.

Mineraalivilla absorboi eli imee hyvin itseensä ääntä varsinkin suurilla taajuuksilla sen huokoisen ja kuitumaisen rakenteen takia. Mineraalivilla on siis myös hyvä äänieriste. Lisäksi mineraalivillat eivät varaa itseensä staattisia sähkövarauksia. [4.]

Polyuretaanieristeen lämmöneristävyys perustuu sen umpisolurakenteeseen sekä solujen sisältämän kaasuseoksen eristävyysominaisuuksiin. Polyuretaani on palava rakennusmateriaali. Siihen voidaan valmistuksen yhteydessä lisätä paloa ehkäiseviä aineita, minkä takia polyuretaani ei ylläpidä paloa, mutta palaa avoliekin yhteydessä.

Polyuretaanieristeen vesihöyrynläpäisevyys on pieni verrattuna muihin yleisempiin lämmöneristeisiin sen umpisolurakenteen ansiosta. Lämmöneristyskyvyn parantamiseksi polyuretaanieristeissä käytetään erilaisia pinnoitteita. Pinnoitteiden avulla estetään myös kosteuden tunkeutuminen polyuretaanieristeeseen. Polyuretaani ei homehdu eikä mätäne. [5, s. 268.]

Polyuretaanin pääraaka-aineet sekoitetaan, jonka jälkeen alkaa kemiallinen reaktio, jossa vapautuu lämpöä. Lämmön vaikutuksesta polyuretaanin sisältämä ponneaine kaasuuntuu ja seoksen tilavuus laajenee. Kemiallisen reaktion vaikutuksesta polyuretaanivahto kovettuu. Näin syntynyt polyuretaani muodostuu lukemattomista pienistä suljetuista soluista, jotka ovat kosketuksissa toisiinsa.

[5, s. 268.]

3.1.3 Työmaatilojen ovet ja ikkunat

Lämmöneristämisen kannalta tilojen heikoimmat osat ovat ikkunat ja ovet. Ikkunaan lasketaan mukaan valoaukko sekä karmi- ja puiteosa. Valoaukon lämmönläpäisyyden vaikuttaa lasikerrosten lukumäärä ja lasikerrosten ilmavälin paksuus. Lisäksi täytyy ottaa huomioon, onko lasivälissä ilmaa vai kaasua. Myös lasien erilaiset pinnoitteet vaikuttavat valoaukon lämmönläpäisyyden. Ovien materiaalit ja niiden paksuudet eroavat seinien materiaaleista ja vastaavasti paksuuksista. Lisäksi oven lämmönläpäisyyden vaikuttaa oven karmit.

Ikkunoissa lasien ilmaväli ja lasikerrosten lukumäärä vaikuttavat lämmönläpäisykerrotimeen. Mitä suurempi ilmaväli ja mitä enemmän lasikerroksia on, sitä pienempi lämmönläpäisykerroin on. Myös lasivälissä oleva kaasu ja lasin pinnoite pienentävät lämmönläpäisykerrointa. Ikkunoiden lämmönläpäisykerroimet ovat moninkertaisia tilan muuhun rakenteeseen nähden. Ovien lämmönläpäisykerroimet ovat pienempiä kuin ikkunoiden, mutta silti suurempia kuin muiden rakenteiden.

Ovien lämmöneristyskyvyn parantamiseen on käytetty työmaatiloissa kahta eri menetelmää: tuulikaappi ja lämpöeriste-elementti (kuva 2). Työmaatilan ulko-ovena käytetyn oven eteen on asennettu tuulikaappi, jolla rajoitetaan vaihtuvan ilman määrää sekä vähennetään vetoisuutta.



Kuva 2. Työmaatilaan on asennettu tuulikaappi ja lämpöeriste-elementti

Työmaatiloissa on aina ulko-ovia, jotka eivät tule käyttöön. Näiden ovien eteen tilan sisäpuolelle on asennettu lämpöeriste-elementti. Elementti koostuu kahdesta vanerilevystä ja siihen liimatusta kovasta polyuretaanieristeestä. Lämpöeriste-elementin avulla saadaan oviaukon eteen lisää eristävää materiaalia, jolloin ovista johtuvat lämpöhäviöt pienenevät. [6, s. 23–25.]

3.2 Ilmalämpöpumppu

3.2.1 Ilmalämpöpumpun toimintaperiaate

Ilmalämpöpumppu koostuu kahdesta kennosta, höyrystimestä ja lauhduttimesta, kompressorista, paisuntaventtiilistä sekä nämä toisiinsa sulkevasta putkistosta. Putkistossa on kylmäaine. Lisäksi molempien kennojen yhteydessä on puhaltimet, jotka liikuttavat ilmaa kennojen läpi. Ilmalämpöpumpuissa on myös nelitieventtiili, jolla kylmäaineen kiertosuunta saadaan vaihdettua eli lämmityskäyttö saadaan muutettua

jäähdytyskäytöksi ja päinvastoin. Toinen kennoista sijaitsee pumpun sisäyksikössä ja toinen ulkoyksikössä (kuva 3):



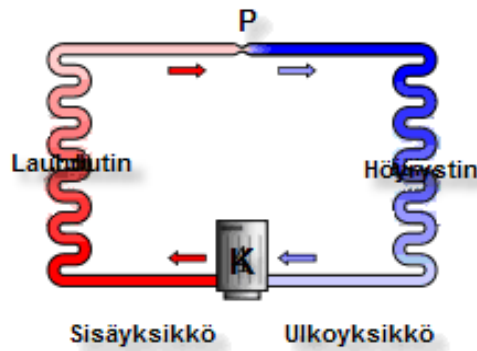
Kuva 3. Ilmalämpöpumpun sisä- ja ulkoyksikkö

Ilmalämpöpumpun toiminta perustuu sen putkistossa kompressorin avulla kiertävän kylmäaineen olomuodon muutokseen. Tätä kutsutaan myös faasimuutokseksi. Tarkoituksena on saavuttaa maksimaalinen eli mahdollisimman nopea olomuodon muutos, jolloin aineen sitovasta tai luovuttavasta energiamäärästä saadaan mahdollisimman suuri.

Kylmäaineen muuttuessa nesteestä höyryksi, se sitoo itseensä voimakkaasti lämpöä, ja kun se tiivistyy höyrystä nesteeksi, vapautuu lämpöä. Ilmalämpöpumpun höyrystimen ja lauhduttimen välillä siirretään siten lämpöä kaasun mukana. [7, s. 6–7; 8.]

3.2.2 Ilmalämpöpumppu lämmityskäytössä

Lämmityskäytössä on tarkoituksena saada ulkoilmasta sidottua energiaa, joka vapautetaan sisäyksikössä lämmittämään sisäilmaa. Kuvassa 4 (ks. seur. s.) esitetään ilmalämpöpumpun toiminta lämmityskäytössä.



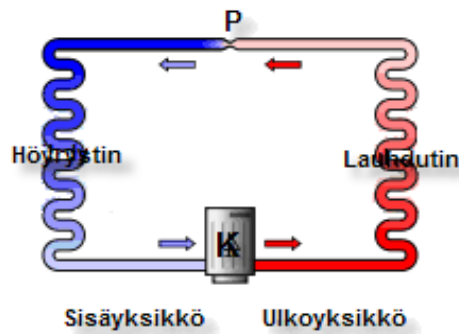
Kuva 4. Ilmalämpöpumppu lämmityskäytössä

Kylmäaine höyrystyy ulkoyksikön höyrystimessä sekä sitoo energiaa itseensä. Samalla kenno kylmenee. Ulkoyksikön puhallin kierrättää kennon läpi ilmaa, jolloin kylmäaine pääsee höyrystymään. Kompressorin imee höyrystyneen kylmäaineen ulkoyksikössä vallitsevan alipaineen avulla lävitseen ja kasvattaa aineen painetta ja lämpötilaa sekä kierrättää kylmäaineen sisäyksikön lauhduttimelle.

Lauhduttimessa kylmäaine nesteytyy ja luovuttaa varastoimansa lämpöenergian. Tällöin lauhdutin lämpenee. Sisäyksikön puhallin imee kennon läpi sisäilmaa, jolloin ilma lämpenee, ja se levittyy lämmitettävään tilaan. Lauhduttimelta nesteeksi muuttunut kylmäaine kulkeutuu kompressorin kehittämän paineen ansioista paisuntaventtiilille. Paisuntaventtiili laskee aineen lämpötilaa ja painetta. Kylmäaine siirtyy ulkoyksikölle sopivassa lämpötilassa ja paineessa, jolloin höyrystyminen tapahtuu uudestaan ulkoyksikön kennolla. [7, s. 7–9; 8.]

3.2.3 Ilmalämpöpumppu jäähdytyskäytössä

Jäähdytyskäytössä sisäilmasta varastoidaan kylmäaineeseen lämpöenergiaa, joka vapautetaan ulkoyksikön kennossa ulos. Kylmäaineen virtaussuunta muutetaan nelitientieventtiilin avulla vastakkaiseen suuntaan kuin lämmityskäytössä. Samalla sisäyksikön kennosta tulee höyrystin ja ulkoyksikön kennosta tulee lauhdutin eli päinvastoin kuin lämmityskäytössä. Kuvassa 5 (ks. seur. s.) esitetään ilmalämpöpumpun toiminta lämmityskäytössä.



Kuva 5. Ilmalämpöpumppu jäähdytyskäytössä

Kun kylmäaine höyrystyy sisäyksikön kennolla, kenno viilenee. Puhaltimella kierrätetään ilmaa kennon läpi, jolloin ilma viilenee ja saadaan levittymään viilennettävään tilaan. Kompressor puristaa kylmäaineen ulkoyksikön kennolle eli lauhduttimelle, jossa aine tiivistyy. Tiivistyessään kylmäaine luovuttaa varastoimansa lämpöenergian ulkoilmaan ulkoyksikön kennon ja puhaltimen avulla. Nesteinä oleva kylmäaine menee painaventtiiliin läpi, minkä jälkeen alkaa aineen höyrystyminen. [7, s. 7–9; 8.]

3.2.4 Ilmalämpöpumpun lämpö- ja jäähdytyskerroin

Ilmalämpöpumpun teknisissä tiedoissa ilmoitetaan COP- ja EER-arvot. COP- (*Coefficient Of Performance*) arvo kertoo, kuinka paljon lämpötehoa voidaan saada syötettyä sähkötehoa kohden. Tämä arvo perustuu ulko- ja sisätilan lämpötilaeroon ja teknisissä tiedoissa ilmoitettu arvo on mitattu jossain tietyssä lämpötilassa. EER- (*Energy Efficiency Ratio*) arvo kuvaa ilmalämpöpumpun jäähdytystehokkuutta, eli kuinka paljon ilmasta saadaan poistettua lämpöä poistamiseen käytettyyn prosessiin kuluvaan tehoon nähden.

COP- ja EER-arvoihin vaikuttavat putkistossa ja kennoilla tapahtuvat energiahäviöt sekä kompressorin tuottama lämpö. Lämpöpumppuja tarkasteltaessa ei siis kannata kiinnittää huomiota vain lämpö- ja jäähdytyskertoimiin vaan ottaa myös huomioon lämmitys- ja jäähdytysteho, ottoteho sekä energiatehokkuus osa- ja täysteholla. [7, s. 4–6; 8.]

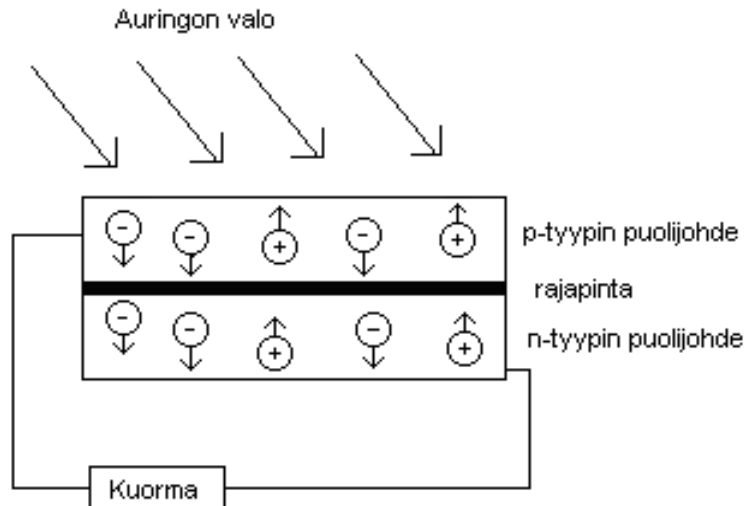
3.3 Aurinkosähköpaneelien toimintaperiaate

Aurinkosähköpaneeleissa auringon säteilyenergia muutetaan sähköenergiaksi. Aurinkopaneeli muodostuu useasta sarjaan kytketystä aurinkokennosta. Aurinkokenno on rakennettu puolijohdemateriaaleista, ja ne tuottavat tasasähköä. Kennojen toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. Tämä tarkoittaa sitä, että valo irrottaa metallilevystä elektroneja. Koska aurinkokennot tuottavat tasasähköä, ne on yleensä kytketty akkuihin tai tasasähkölaitteisiin. Yleisimmin käytetyt laitteet toimivat kuitenkin vaihtosähköllä, joten tasasähkö muutetaan vaihtosähköksi vaihtosuuntaajalla. Kuvassa 6 nähdään aurinkosähköpaneelit työmaatilán katolle asennettuna:



Kuva 6. Työmaatilojen katolla olevat aurinkopaneelit

Aurinkokennot koostuvat kahdesta puolijohdekerroksesta: n-tyyppinen ja p-tyyppinen. Puolijohteiden väliin muodostuu niiden rajapinta. Kun auringon säteily osuu p-tyypin puolijohteeseen eli katodiin, siitä irtoaa elektroneja, jotka kulkeutuvat n-tyypin puolijohteelle eli anodille. Samalla katodille jää aukkoja. Näin kennoon syntyy sisäinen sähkökenttä kerrosten yli. Samalla syntyy elektroniaukkopareja, jotka puolestaan synnyttävät kytkettyyn piiriin sähkövirran. (Kuva 7, ks. seur. s..)



Kuva 7. Aurinkokennon toimintaperiaate

Katodista pystyy irtoamaan elektroneja valon avulla vain silloin, kun sen taajuus ylittää tietyn kynnystaajuuden. Kynnystaajuus taas riippuu katodimateriaalista. Kun valon taajuus ylittää katodimateriaalin kynnystaajuuden, irtoavien elektronien lukumäärä on riippuvainen valon intensiteetistä eli tehosta pinta-alayksikköä kohti. Elektroneja irtoaa sitä enemmän, mitä suurempi valon intensiteetti on.

Aurinkokennon pinta, johon valo osuu, on päällystetty valon heijastumista estävällä kerroksella. Kennon tehokkuuteen vaikuttaa ennen kaikkea valittu puolijohdemateriaali. Sen tulisi pystyä imemään itseensä, absorboida, mahdollisimman tehokkaasti valoa mahdollisimman laajalla aallonpituusalueella. [9.]

4 Työmaan sähkönkulutustietojen vertailu

4.1 Työmaan lähtötiedot

Seuraavassa käsitellyt mittaustulokset ovat todellisen rakennustyömaan sähkönkulutustiedot. Työmaatilaryhmälle ja työmaalle tuli omat syöttönsä eri jakamoista, joten molemmilla oli omat sähkönkulutusmittaukset. Työmaa oli kooltaan suurehko kerrostalotyömaa, joka on rakennettu 2 vaiheessa. Yhteensä valmistui 4 kuusikerroksista rakennusta, joissa oli yhteensä 8 porrasta. Kerrostaloalue valmistui Helsinkiin.

Tutkitun työmaan sähkönkulutustiedoista valittiin tarkasteluajanjaksoväliksi 1 vuosi. Todellisesta kulutusvälistä jäi pois muutama kuukausi alusta ja muutama kuukausi lopusta. Ajanjakson aikana työmaalla oli kesäkuusta syyskuuhun (4 kk) 14 työmaatilaa ja lokakuusta toukokuuhun (8 kk) 15 työmaatilaa. Työmaatilat eivät ole samanlaisia keskenään, mutta rakenne on sama kuin vertailutilassa A (ks. liite 1). Lisäksi työmaatilaryhmässä ei ollut käytössä ilmalämpöpumppuja eikä aurinkopaneeleita. Tilat oli asennettu osittain kahteen kerrokseen.

4.2 Työmaatilaryhmän sähkönkulutus

Taulukossa 2 esitetään työmaatilaryhmää syöttävästä liittymästä mitatut kulutustiedot. Kulutustietojen avulla voidaan laskea työmaatilaryhmän lämmitykseen kulunut energiamäärä ja työmaatilan keskimääräinen lämmitysenergian tarve.

Taulukko 2. Työmaatilojen käyttöpaikan sähkönkulutustiedot

Ajanjakso	Lukuväli / pv	Teho / kW	Päiväsiirto / kWh	Yösiirto / kWh	Sähköenergia yhteensä / kWh
Kesäkuu	30	21	2 393	1 796	4 189
Heinäkuu	31	34	1 836	951	2 787
Elokuu	31	23	2 906	1 398	4 304
Syyskuu	30	30	4 115	1 961	6 076
Lokakuu	31	36	7 564	4 171	11 735
Marraskuu	30	34	7 502	4 215	11 717
Joulukuu	31	45	10 281	5 771	16 052
Tammikuu	30	92	12 999	7 330	20 329
Helmikuu	28	46	10 586	6 057	16 643
Maaliskuu	31	42	8 831	5 346	14 177
Huhtikuu	30	29	5 635	3 453	9 088
Toukokuu	31	28	4 020	2 281	6 301

Taulukon 2 päiväsiirto tarkoittaa ajallisesti 07–22 ja yösiirto 22–07. Päiväsiirrolle tulee siis 15 tuntia ja yösiirrolle 9 tuntia käyttöaikaa. Työmaatilaryhmän kokonaisenergiankulutus tutkitulla aikavälillä oli 123 398 kWh ja kuukaudessa keskimäärin 10 283 kWh. Päiväsiirron osuus kokonaisenergiasta oli noin 64 % ja yösiirron osuus oli noin 36 %. Lukuja ei kuitenkaan voi verrata suoraan keskenään, koska päivä- ja yösiirtoajoissa on 6 tunnin ero.

Päiväsiirron energiamäärään vaikuttaa sähkölämmityksen lisäksi käyttöveden lämmitys, tilojen sisä- ja ulkovalaistus, toimistolaitteet ja työvaatteiden kuivatus kuivaushuoneissa

sekä kuivauskaapeissa. Päivä- ja yösiirtojen energiamääriin vaikuttavaa putkistojen saattolämmitystä, ja päiväsiirron energiamäärään vaikuttavaa vaatteiden kuivatusta ja ulkovalaistusta ei oteta laskelmissa huomioon.

Suurin osa sisävalaistuksen ja toimistolaitteiden ottamasta sähkötehosta muuttuu lämmöksi, joka lämmittää työmaatilojen sisäilmaa. Oletetaan, että laitteiden kuluttamasta sähköstä saadaan 95 % hyödynnettyä tilojen lämmityksessä. Tämän perusteella arvioidaan kulutuslaitteiden osuudeksi 5 % päiväsiirron energiamäärästä.

Työmaatiloissa tarvitaan lämmintä käyttövettä ja sen kulutus on riippuvainen työntekijämäärästä. Kyseisellä työmaalla oli käytössä käyttöveden lämmitykseen kaksi 300 l lämminvesivaraajaa ja lisäksi yksi pienempi, 15 l, lämminvesivaraaja. Oletetaan, että suuret lämminvesivaraajat lämmittävät vettä täydellä teholla noin 10 tuntia vuorokaudessa keskimäärin 21 päivän aikana kuukaudessa. Pieni varaaja on käytössä täydellä teholla keskimäärin 4 tuntia vuorokaudessa 21 päivän aikana kuukaudessa. Suuren lämminvesivaraajan teho on 3 kW ja pienen 1 kW. Niiden kuluttama energiamäärä vuodessa on noin 15 204 kWh. Tämän pohjalta kuukausittain kuluvaksi energiamääräksi saadaan 1 267 kWh. Käyttöveden lämmityksen osuus päiväsiirron energiasta on noin 20 % ja kokonaisenergiankulutuksesta noin 12 %.

Taulukossa 3 esitetään kulutuslaitteiden ja lämpimän käyttöveden kulutusten osuus päiväsiirron osuudesta sekä lämmitykseen päiväsiirrosta kuluva energiamäärä.

Taulukko 3. Lämmityksen ja muun kulutuksen osuudet päiväsiirrosta

Ajanjakso	Päiväsiirto / kWh	Kulutuslaitteet 5 % / kWh	Lämmin käyttövesi / kWh	$E_{\text{päivälämmitys}}$ / kWh
Kesäkuu	2 393	120	1 267	1 006
Heinäkuu	1 836	92	1 267	477
Elokuu	2 906	145	1 267	1 494
Syyskuu	4 115	206	1 267	2 642
Lokakuu	7 564	378	1 267	5 919
Marraskuu	7 502	375	1 267	5 860
Joulukuu	10 281	514	1 267	8 500
Tammikuu	12 999	650	1 267	11 082
Helmikuu	10 586	529	1 267	8 790
Maaliskuu	8 831	442	1 267	7 122
Huhtikuu	5 635	282	1 267	4 086
Toukokuu	4 020	201	1 267	2 552

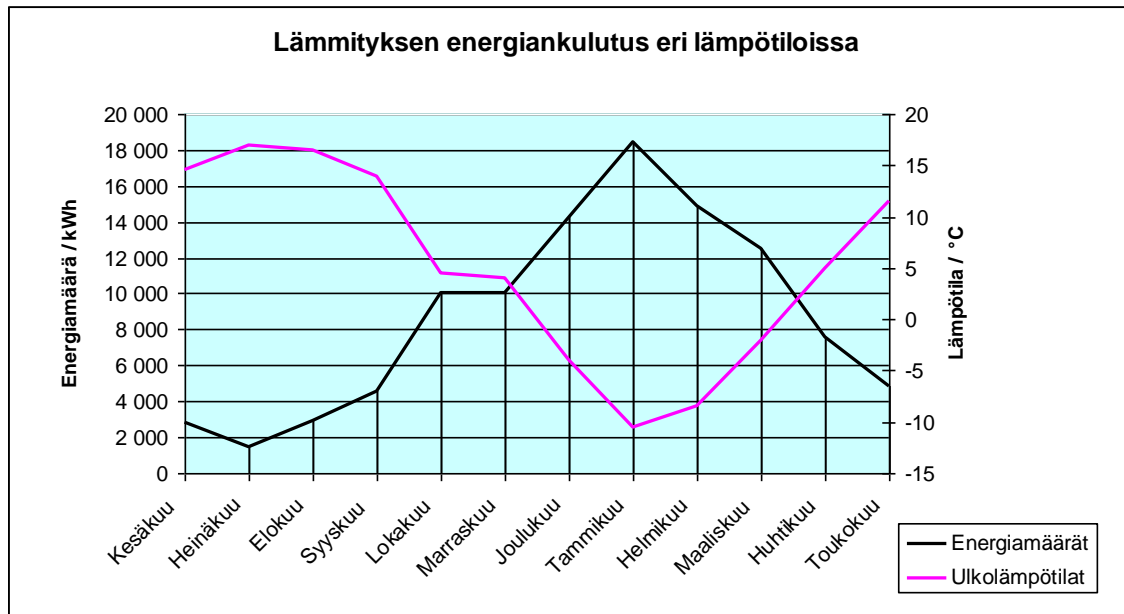
Oletetaan, että yösiirron energiamäärä kuluu pelkästään työmaatilojen lämmitykseen. Työmaatilojen lämmitykseen tarvittava kokonaisenergiamäärä on taulukon 2 (ks. s. 14) yösiirtojen energiamäärien ja taulukon 3 (ks. edell. s.) päivälämmitysenergiamäärien summa (taulukko 4). Taulukossa 4 on lisäksi esitetty lämmitysenergiamäärät tehoina. Ryhmän vaatima lämmitysteho saadaan jakamalla lämmitysenergiamäärä kuukauden lukuvälin ja vuorokauden tuntimäärän tulolla. Yhden tilan lämmitykseen kuluva teho saadaan jakamalla ryhmän ottama lämmitysteho kuukaudessa olleiden tilojen määrällä.

Taulukko 4. Työmaatilojen lämmityskulutukset

Ajanjakso	$E_{\text{lämmitys}} / \text{kWh}$	$E_{\text{läm. / tila}} / \text{kWh}$	$P_{\text{lämmitys}} / \text{kW}$	$P_{\text{läm. / tila}} / \text{W}$
Kesäkuu	2 802	200	3,9	278
Heinäkuu	1 428	102	1,9	137
Elokuu	2 892	207	3,9	278
Syyskuu	4 603	329	6,4	457
Lokakuu	10 090	673	13,6	904
Marraskuu	10 075	672	14,0	933
Joulukuu	14 271	995	19,2	1 279
Tammikuu	18 412	1 227	25,6	1 705
Helmikuu	14 847	990	22,1	1 473
Maaliskuu	12 468	831	16,8	1 117
Huhtikuu	7 539	503	10,5	698
Toukokuu	4 833	322	6,5	433

Työmaatilaryhmän lämmitykseen kuluva kokonaisenergiamäärä on 104 260 kWh ja kuukaudessa keskimäärin 8 688 kWh. Yhden tilan lämmitykseen kuluva kokonaisenergiamäärä on 7 051 kWh ja kuukaudessa keskimäärin 588 kWh. Kuukausittainen keskimääräinen lämmitystehon tarve tilaryhmällä on 12 kW ja yhden tilan lämmitystehon tarve on 808 W. Työmaatila kuluttaa sähköä eniten tammikuussa ja vähiten heinäkuussa. Tammikuussa sähköä kuluu neliötä kohden 16,8 kWh/m² ja heinäkuussa 1,4 kWh/m². Tehot neliötä kohden vaihtelevat siis suuresti vuoden aikana.

Lämmityskulutukset ovat riippuvaisia ulkolämpötiloista. Taulukosta 4 nähdään, että lämmitykseen kuluva energiamäärä kasvaa talvella. Lisäksi lämpimänä kesänä lämmitystä ei tarvita yhtä paljon kuin kylmänä kesänä. Kylmän talven aikana lämmitykseen kuluu enemmän energiaa kuin leudomman talven aikana. Kuvassa 8 (ks. seur. s.) esitetään energiamäärien ja ulkolämpötilojen keskimääräiset vaihtelut kuukausittain.



Kuva 8. Kuukausien keskimääräiset lämmitysenergian kulutukset ja ulkolämpötilat [10; 11]

Kuvasta 8 nähdään hyvin ulkolämpötilan vaikutus kuluvaan lämmitysenergiämäärään. Ulkolämpötilan kasvaessa sähkönkulutus pienenee ja päinvastoin.

Työmaatiloissa liikkuminen sisään ja ulos on vilkasta. Kesäisin tämä ei vaikuta juuri-kaan tilojen lämmitykseen, koska tiloihin tulevan ulkoilman lämpötila on suurempi tai hieman pienempi kuin sisälämpötila. Talvisin tilojen sisälle pääsee virtaamaan kylmää ilmaa, jolloin lämmitykseen tarvitaan enemmän energiaa.

Vaikka ulkovalaistuksen ja putkistojen saattolämmityksen sähkönkulutusta ei otettu huomioon laskelmissa, niin niiden vaikutukset näkyvät kuitenkin mittaustuloksissa. Ulkoalueiden valaistus on tarvittavaa pimeiden kuukausien aikana ja putkiston saattolämmitys kylmien kuukausien aikana. Käytännössä siis molemmat vaikuttavat sähkönkulutukseen loppusyksystä alkukevääseen.

Hyvän vertauskohdan työmaatilojen lämmityskulutukselle antaa pientalon tarvitsema lämmitysenergian määrä. Taulukossa 5 (ks. seur. s.) esitetään muutaman erikokoisen pientalon vuotuiset sähkön kulutukset. Luvut ovat arvioita pientaloille, joissa on suora sähkölämmitys.

Taulukko 5. Arvioituja suoran sähkölämmityksen osuuksia erikokoisten pientalojen kokonaiskulutuksista.

Ihmisten lukumäärä	1	2	3	4	5
Rakennuksen pinta-ala / m ²	30	60	90	120	150
Kulutus / kWh	6 600	10 900	14 600	18 000	21 110
Lämmityksen osuus / kWh	3 300	5 450	7 300	9 000	10 550

Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että sähköllä lämmitetyssä pientalossa noin puolet sähkönkulutuksesta kuluu lämmitykseen. Loppu kulutus jakaantuu muiden sähkölaitteiden kulutuksen ja käyttöveden lämmityksen välillä. [7, s. 18–22.]

Verrattaessa pinta-alaltaan noin 18 m²:n työmaatilán vuotuista lämmitykseen kuluvaá energiámäärää taulukon 5 arvoihin huomataan, että yhden työmaatilán lämmityksen osuus sähkönkulutuksesta on myös kuin 60 m²:n pientalon lämmityksen osuus. Työmaatilán pinta-ala on kuudesosa 120 m²:n pientalon pinta-alasta. Työmaatilán lämmitykseen kuluvan sähkön osuus on kuitenkin melkein 80 % 120 m²:n pientalon lämmitykseen kuluvaá sähkön määrästä.

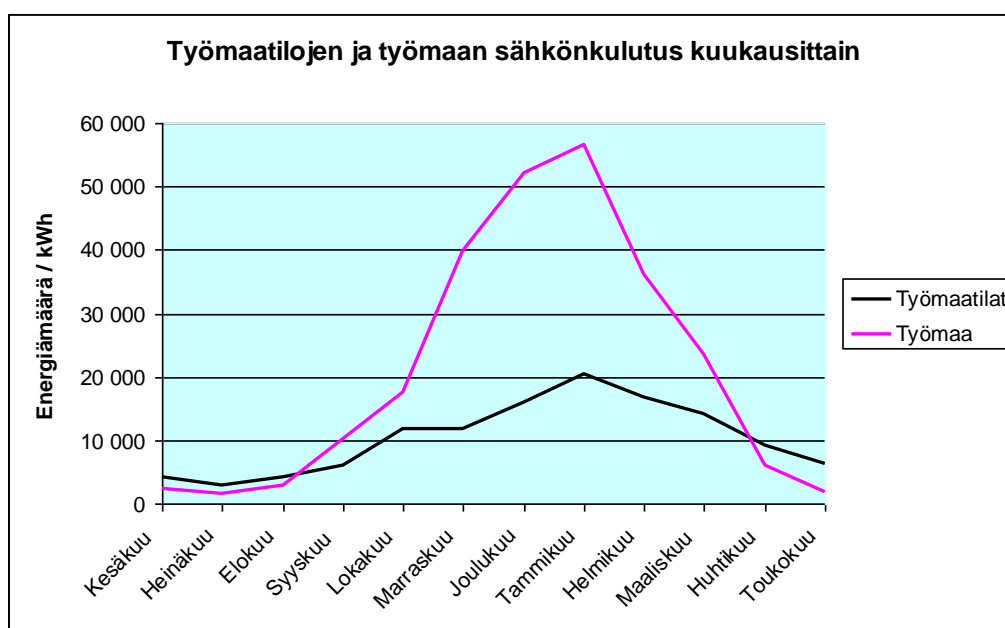
4.3 Sähkönkulutuksen vertailu ja kustannukset

Taulukossa 6 esitetään työmaan sähkönkulutuksen mitattuja arvoja. Valittu aikaväli on sama kuin työmaatilójen sähkönkulutustiedoissa. Taulukossa näkyy myös sähköverkosta otetun loistehón määrä, jota ei ollut työmaatilaryhmän mittaustiedoissa. Energiayhtiöt veloittavat verkosta otetun loistehón erikseen ja yleensä silloin, kun otetun tehón määrä ylittää sallitun rajan.

Taulukko 6. Työmaan käyttöpaikan sähkönkulutustiedot

Ajanjakso	Lukuväli / pv	Loisteho / kvar	Teho / kW	Päiväsiirto / kWh	Yösiirto / kWh	Sähköenergia yhteensä / kWh
Kesäkuu	30	4	11	1 525	802	2 327
Heinäkuu	31	6	11	1 204	498	1 702
Elokuu	31	9	18	1 992	776	2 768
Syyskuu	30	18	40	7 128	3 145	10 273
Lokakuu	31	18	47	11 929	5 520	17 449
Marraskuu	30	20	115	25 910	13 874	39 784
Joulukuu	31	19	113	33 561	18 632	52 193
Tammikuu	30	44	212	36 188	20 317	56 505
Helmikuu	28	12	94	23 152	13 043	36 195
Maaliskuu	31	11	61	15 330	8 332	23 662
Huhtikuu	30	11	29	4 076	1 982	6 058
Toukokuu	31	2	10	1 292	434	1 726

Työmaan sähkönkulutukseen vaikuttaa moni asia. Näitä ovat muun muassa torninosturit, rakennushissit, ulko-, yleis- ja työpistevalaistus, lämmitys ja kuivatus. Sähkönkulutukseen vaikuttaa myös työmaan rakennusvaihe vuodenaikaan nähden. Esimerkiksi betonivalulle tarvitaan kylmien kuukausien aikana lämmitys, ettei betoni jäädy. Tutkitulla työmaalla on ollut torninosturi joulukuun alkuun asti ja lämmitys toteutettu sähkölämmittimillä sekä vesikennopuhaltimella. Kuvassa 9 esitetään työmaan ja työmaatilojen energiakulutukset:



Kuva 9. Työmaatilojen ja työmaan energian kulutus

Kuvasta 9 nähdään, että työmaatilojen kuluttama energiamäärä on ollut suurempi muutaman kuukauden aikana. Tähän vaikuttaa työmaan vaihe ja vuodenajat, ja työmaatilaryhmän koko. Työmaatilojen kuluttama sähköenergiamäärä on 123 398 kWh ja työmaalla kulunut sähköenergiamäärä on 250 642 kWh valitulla aikavälillä. Kokonaisenergiakulutus on siis 374 040 kWh. Työmaatilojen sähkönkulutus oli kyseisellä rakennustyömaalla 33 % työmaan kokonaissähkönkulutuksesta. Työmaan osuus kokonaissähkönkulutuksesta oli 67 %.

Sähkön kulutuksen kustannusvertailua varten arvioitiin sähkön hinnaksi 10,82 snt/kWh Energiamarkkinaviraston sähkön hinnan kehitys tilaston perusteella. Hinta on vuodelle 2010 ilmoitettujen verollisten kokonaishintojen keskiarvo. Tyypikäyttäjäksi valittiin pientalo huonekohtaisella sähkölämmityksellä. Käytetty hinta ei vastaa tutkitun

rakennustyömaan sähkön kulutuksen kustannusta kWh:a kohden, koska yrityksille käytetään erilaista hinnoittelua. [12.]

Arvioidulla sähkön hinnalla tarkastellun työmaan kokonaissähkönkulutuksen kustannukseksi tarkasteluajanjaksolla saadaan noin 40 470 €, josta työmaatilojen osuus on noin 13 350 € ja työmaan osuus noin 27 120 €. Työmaatilaryhmän lämmityskustannukset ovat noin 11 280 € vuodessa ja yhden työmaatilalan lämmityskustannukset noin 763 €. 60 m² pientalon lämmityskustannukset ovat vuodessa noin 590 € ja 120 m² pientalon lämmityskustannukset noin 974 €.

5 Eristeiden vaikutus lämmityskulutuksessa

5.1 Lämmöneristevertailun lähtötiedot

Työmaatilojen lämmöneristevertailun mittaukset suoritettiin ajalla 22.1.–18.2.2010. Tiloja lämmitettiin samantlaisilla sähkölämmittimillä ja sisälämpötilat pyrittiin pitämään 20–21 °C. Sisä- ja ulkolämpötilat sekä kulutetut tehot kirjattiin muutaman päivän välein. Vertailu suoritettiin ulkona.

Vertailussa ei otettu huomioon ovien availua eikä sisäisten lämmönlähteiden vaikutusta kulutukseen. Koska koe suoritettiin ulkona, esimerkiksi tuuli ja aurinko vaikuttivat tuloksiin. Työmaatilojen ilmanvaihtoventtiilit oli suljettu, joten tuloksiin vaikutti vain rakenteiden hallitsemattomat vuodot.

Taulukossa 7 esitetään yrityksellä käytössä olevien vertailutilojen A ja B, ja muutaman lämmöneristevertailussa mukana olleen tilan rakenteiden lämmöneristysmateriaalit ja niiden paksuudet.

Taulukko 7. Tilojen rakenteiden eristemateriaalit ja -paksuudet

		Vertailutila A	Vertailutila B	Testitila 1	Testitila 2	Testitila 3
Eristemateriaali		Mineraalivilla	Polyuretaani	Mineraalivilla	Polyuretaani	Min.villa + polyuret.
Eristeiden paksuudet	Seinät / mm	100	95	100	95	60 (poly.)
	Lattia / mm	150	123	150	123	150 (villa)
	Katto / mm	150	123	125	123	95 (poly.)

Testitila 1 on rakenteeltaan melkein samanlainen kuin vertailutila A. Ainoa ero on katon mineraalivillakerroksen paksuudessa. Testitila 2 on rakenteeltaan täysin samanlainen kuin vertailutila B. Mukaan otetaan myös kolmas testitila, jotta saadaan parempi vertailu tilojen välillä. Vertailutyömaatilat A ja B ovat yrityksen käytössä olevat työmaatilatyypit ja testitilat lämmöneristevertailussa olleet tilat.

5.2 Vertailutilojen U-arvot ja lämmöneristevertailun tulokset

Vertailutilojen A ja B rakennusosien eli seinien, katon ja lattian, lämmönläpäisykertoimet on laskettu Suomen rakennusmääräyskokoelman osan C4 mukaan. Tarvittavat normaalit lämmönjohtavuusarvot, sisä- ja ulkopuoliset pintavastukset, rakennusosissa olevat ilmakerroksen lämmönvastukset ja ohuiden aineiden lämmönvastukset on otettu RakMK C4:n taulukoista 1, 2 ja 5. Työmaatiloille U-arvoja määritettäessä ei oteta mukaan maan lämmönvastusta. Taulukossa 8 esitetään vertailutiloille määritetyt U-arvot ja niiden laskenta esitetään liitteessä 2. Liitteestä 1 on luettavissa rakennusosissa käytettyjen aineiden paksuudet. [3.]

Taulukko 8. Lasketut rakennusosien U-arvot

Rakennusosa	Lämmönläpäisykerroin $U / W/(m^2 K)$	
	Vertailutila A	Vertailutila B
Katto	0,33	0,23
Seinä	0,46	0,30
Lattia	0,34	0,23

Taulukosta 8 nähdään, että molemmissa tiloissa seinän U-arvo on huonoin. Katto ja lattia ovat lämmönläpäisyltään samaa luokkaa, kun taas seinät läpäisevät eniten lämpöä. Vertailutilan A ja B välinen ero on suuri. Tilan A U-arvot ovat noin 0,1 yksikköä suuremmat kaikissa osissa kuin tilan B. Tilan A rakennusosat läpäisevät enemmän energiaa kuin tilan B. Voidaan siis olettaa, että vertailutila A kuluttaa enemmän energiaa kuin vertailutila B.

Taulukossa 9 (ks. seur. s.) esitetään lämmöneristevertailusta saadut tulokset ajalta 25.1.–18.2.2010. Mittauksien aloituspäivänä 22.1.2010 ulkolämpötila oli -17,3 °C, testitilan 1 sisälämpötila oli 20,9 °C, testitilan 2 sisälämpötila oli 22,1 °C ja testitilan 3 sisälämpötila oli 23,1 °C.

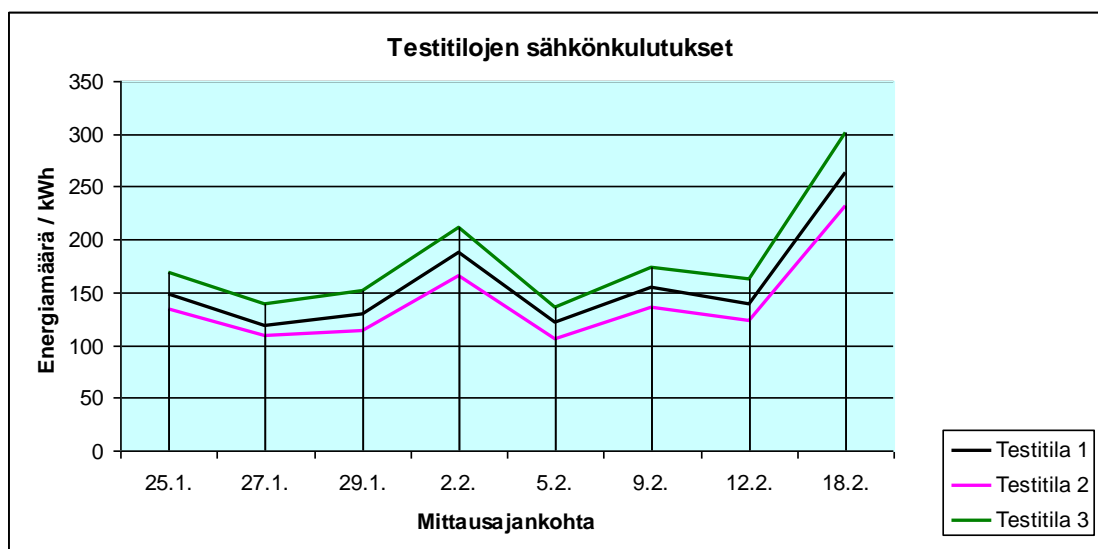
Taulukko 9. Lämpöeristevertailun tulokset

Testitilat		Mittauspäivämäärät							
		25.1.	27.1.	29.1.	2.2.	5.2.	9.2.	12.2.	18.2.
1	Energia / kWh	148	118	130	187	122	155	138	263
	Sisälämpötila / °C	20	20,5	20,5	20,1	20,3	20,4	20,3	21,2
	Ulkolämpötila / °C	-10	-15,2	-16,6	-7	-2,4	-7,4	-7,3	-11,8
2	Energia / kWh	134	109	114	166	106	135	123	232
	Sisälämpötila / °C	20,3	20,8	20,9	20	20,3	20,2	20,6	20,4
	Ulkolämpötila / °C	-10	-15,2	-16,6	-7	-2,4	-7,4	-7,3	-11,8
3	Energia / kWh	169	138	151	212	136	174	162	301
	Sisälämpötila / °C	20,6	20,7	21	20,2	20,1	20,9	20,5	20,8
	Ulkolämpötila / °C	-10	-15,2	-16,6	-7	-2,4	-7,4	-7,3	-11,8

Energiakulutustuloksia luetaan niin, että energiamäärä mittauspäivän kohdalla on edellisestä mittauspäivästä tähän asti kulunut energiamäärä. Sisä- ja ulkolämpötilat ovat mittaushetken lämpötilat. Sisälämpötilojen arvojen perusteella lämpötilat ovat pysyneet hyvin asetetun lämpötilavälin sisäpuolella ja hyvin tasaisina mittauspäivien aikana.

Testitilojen 1, 2 ja 3 rakennuspinta-alat ovat noin 85 m². Tilan 1 energiankulutus mittausajanjaksolla yhteensä on 1 261 kWh, tilan 2 energiankulutus yhteensä on 1 119 kWh ja tilan 3 energiankulutus yhteensä on 1 443 kWh. Tilan 1 energiankulutus on noin 13 % suurempi kuin tilan 2 ja noin 13 % pienempi kuin tilan 3. Tilan 2 energiankulutus on noin 23 % pienempi kuin tilan 3. Energiankulutus neliötä kohden mittausjakson aikana saadaan jakamalla kulutus rakennuspinta-alalla. Tilan 1 kulutukseksi saadaan 14,8 kWh/m², tilan 2 kulutukseksi saadaan 13,1 kWh/m² ja tilan 3 kulutukseksi saadaan 16,9 kWh/m². Paras lämmöneristys löytyy tilasta 2, seuraavaksi paras on tila 1 ja huonoin tila 3.

Lämmöneristevertailun antamia tuloksia ei voida verrata luvussa 4.2 saatuihin tuloksiin. Lämmöneristevertailun tilat ovat jokaiselta pinnaltaan suoraan ulkoilmaa vasten, kun taas työmaatilaryhmässä tilat on asennettu vierekkäin ja päällekkäin, jolloin kaikki rakennusosat eivät ole suoraan ulkoilmaa vasten. Lisäksi luvun 4.2 tuloksiin vaikuttavat sisäiset lämmönlähteet ja ovien availu, mitä ei otettu huomioon lämmöneristevertailussa.



Kuva 10. Testitilojen sähkönkulutukset mittausjakson aikana

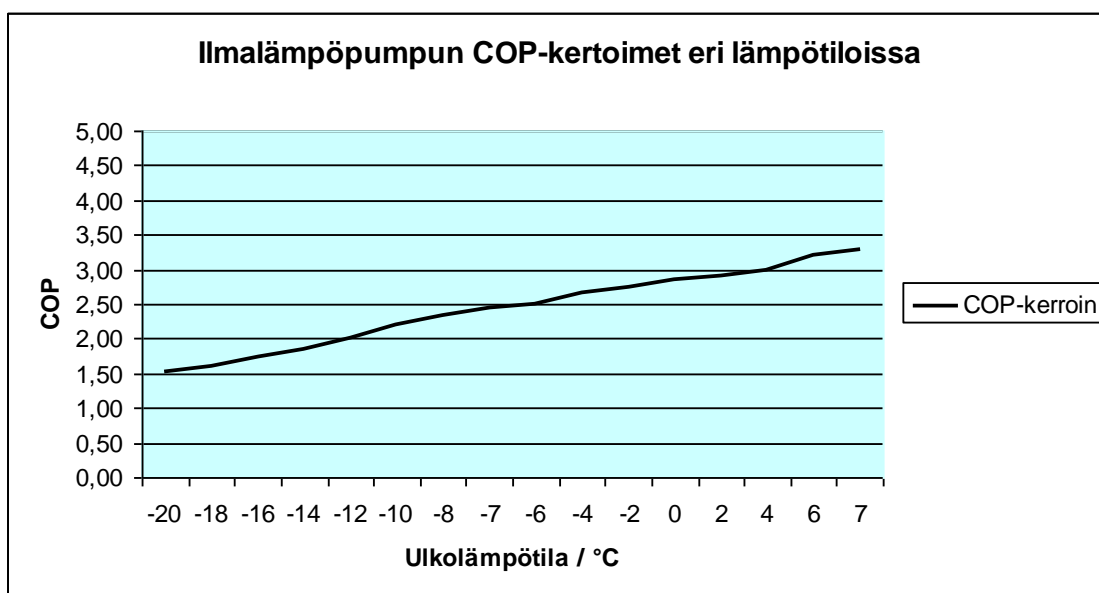
Kuvassa 10 on esitetty testitilojen sähkönkulutukset. Kuvaajat ovat hyvin samanmuotoisia. Joillakin mittausajankohdilla hajontaa energiankulutuksien välillä syntyy hieman enemmän.

6 Ilmalämpöpumpun laskennallinen malli

6.1 Laskennan tarvittavat lähtötiedot

Ilmalämpöpumpuille on määritetty saavutettavia lämmitysenergiesäästöjä tavanomaisessa pientalossa. Määritykset perustuvat joko teoriaan tai ilmalämpöpumpuille tehtyihin tehomittauksiin. Lisäksi ilmalämpöpumpun lämpökertoimen vaikutuksesta energiasuuksiin on taulukoituja arvoja. Tehtyjen määritysten pohjalta saadaan laskettua ilmalämpöpumpun vaikutus sähköenergian kulutukseen, kun lämmitykseen tarvittava energiamäärä tiedetään.

Työmaatiloissa käytetylle ilmalämpöpumpputypille, Zibro S1825S, on mitattu lämpökertoimet eri lämpötiloissa. Kuvassa 11 (ks. seur. s.) esitetään mittauksista saadut lämpökertoimet kyseiselle ilmalämpöpumpulle.



Kuva 11. Ilmalämpöpumpulle mitatut lämpökertoimet lämpötilan funktiona [13]

Kuvasta 11 nähdään, että lämpökerroin lämpötilan funktiona on melko lineaarinen. Alhaisilla lämpötiloilla COP-kerroin on huono ja korkeammilla lämpötiloilla se paranee. Ilmalämpöpumppujen käytössä on huomioitavaa, että alle -20 °C lämpötiloissa lämpökertoimet menevät yleensä niin pieniksi, että käyttö ei ole enää järkevää. Mitä korkeammaksi ulkolämpötila nousee, sitä vähemmän tarvitaan lämmitystä ja jossain vaiheessa ilmalämpöpumppu asetetaan jäähdytyskäyttöön. Liitteessä 3 esitetään käytetyn ilmalämpöpumpun tekniset tiedot. [13.]

6.2 Ilmalämpöpumpun lämmitysenergiesäästö työmaatilaryhmässä

Ilmalämpöpumppuja on pääsääntöisesti asennettu toimistotiloihin. Toimistotiloissa ollaan päivän aikana pidempiä aikoja kuin sosiaalitiloissa. Lisäksi kiinnostus ilmalämpöpumppuihin on alun perin ollut jäähdytyksessä eikä lämmityksessä. Työmaatilojen sisälämpötila nousee varsinkin kuumana kesänä korkeaksi ja tuuletukseen on käytetty vain pieniä tuuletusikkunoita tai itse säädettäviä mekaanisia tuuletusventtiileitä.

Ilmalämpöpumpun vaikutus lämmitysenergian kulutukseen lasketaan niin, että osa tilojen lämmityksestä tapahtuu suoralla sähköllä ja osa ilmalämpöpumpulla. Oletuksena voidaan pitää, että 1 kW :n teho riittää lämmittämään noin 30 m^2 :n alan. Käytetyn ilmalämpöpumpun teho riittää siis noin 90 m^2 :n lämmitykseen, jolloin sen lämmitysteho

juuri riittäisi. Tämän perusteella voidaan laskea tutkitulle työmaatilaryhmälle energia- säästöt niin, että 10 työmaatilaa lämmitetään suoralla sähköllä ja 5 tilaa ilmalämpöpumpulla. Laskennassa käytetään apuna kuvan 12 mukaisia kertoimia sähkö- ja ilmaisenergian osuuksille eri COP-kertoimilla. Ilmaisenergian osuus tarkoittaa ilmasta saatavaa lämmitysenergian osuutta.

Lämpökerroin	Sähköenergiaa	Ilmaisenergiaa
4	25 %	75 %
3,9	26 %	74 %
3,8	26 %	74 %
3,7	27 %	73 %
3,6	28 %	72 %
3,5	29 %	71 %
3,4	29 %	71 %
3,3	30 %	70 %
3,2	31 %	69 %
3,1	32 %	68 %
3	33 %	67 %
2,9	34 %	66 %
2,8	36 %	64 %
2,7	37 %	63 %
2,6	38 %	62 %
2,5	40 %	60 %
2,4	42 %	58 %
2,3	43 %	57 %
2,2	45 %	55 %
2,1	48 %	52 %
2	50 %	50 %

Kuva 12. Lämpöpumpun lämpökertoimen vaikutus energiaosuuksiin [14]

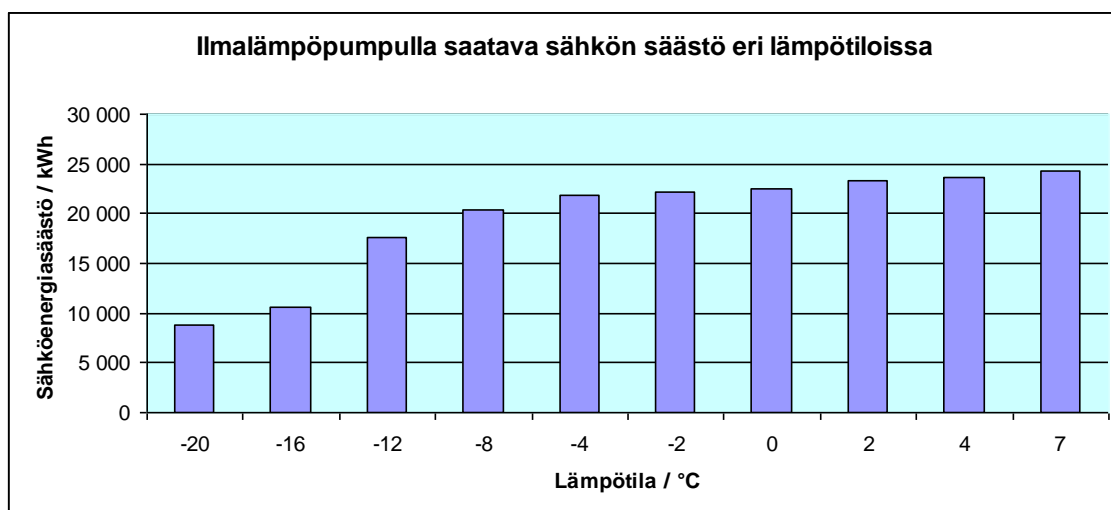
Lämpökertoimen ollessa 1,5 sähköenergian osuus on 75 % ja ilmaisenergian osuus 25 %. lämpökertoimen ollessa 1 sähköenergian osuus on 100 %. Taulukossa 10 esitetään kuvien 11 (ks. edell. s.) ja 12 perusteella muutamalle ulkolämpötilalle ilmalämpöpumpun ottaman sähköenergian ja ilmaista saatavan lämpöenergian osuudet.

Taulukko 10. Sähkön ja ilmaisen energian osuudet eri lämpötiloilla

Lämpötila / °C	-20	-16	-12	-8	-4	-2	0	2	4	7
Lämpökerroin	1,5	1,7	2,0	2,4	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,2
Sähkön osuus	0,75	0,7	0,5	0,42	0,38	0,37	0,36	0,34	0,33	0,31
Ilmaisenergian osuus	0,25	0,3	0,5	0,58	0,62	0,63	0,64	0,66	0,67	0,69

Taulukon 10 perusteella saadaan laskettua vuotuiset lämmitysenergasäästöt eri lämpötiloilla, kun vuotuinen lämmitysenergiämäärä tiedetään (kuva 13, ks. seur. s.). Yhden

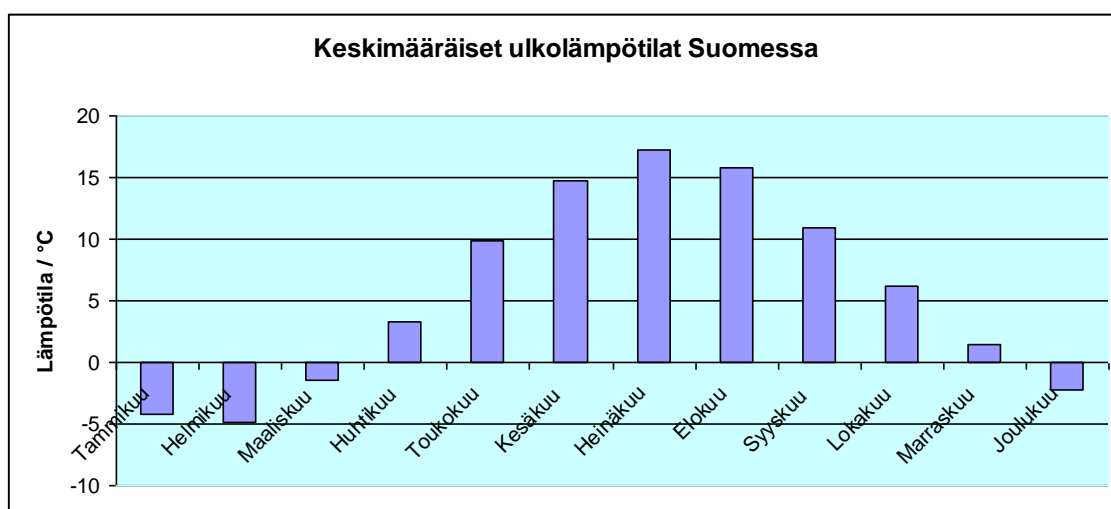
työmaatilán vuotuinen lämmitysenergian kulutus on 7 051 kWh, jolloin viiden työmaati-
lan tarvitsema vuotuinen lämmitysenergiámäärä on 35 255 kWh. [7, s. 18–22.]



Kuva 13. Sähköenergian säästö eri lämpötiloilla

Taulukon 10 (ks. edell. s.) ja kuvan 13 arvoista huomataan, että säästettävä energia-
määrä on pieni alhaisilla lämpötiloilla. Säästettävän energian osuus kuitenkin paranee
kohtalaisesti -12 °C jälkeen, jolloin sen kasvunopeus myös pienenee.

Lasketaan seuraavaksi 5 työmaatilaryhmän kuluttama lämmitysenergiámäärä, kun
lämmitys toteutetaan ilmalämpöpumpulla. Ulkolämpötiloina käytetään keskimääräisiä
kuukausilämpötiloja (kuva 14).



Kuva 14. Keskimääräiset ulkolämpötilat kuukausittain [15]

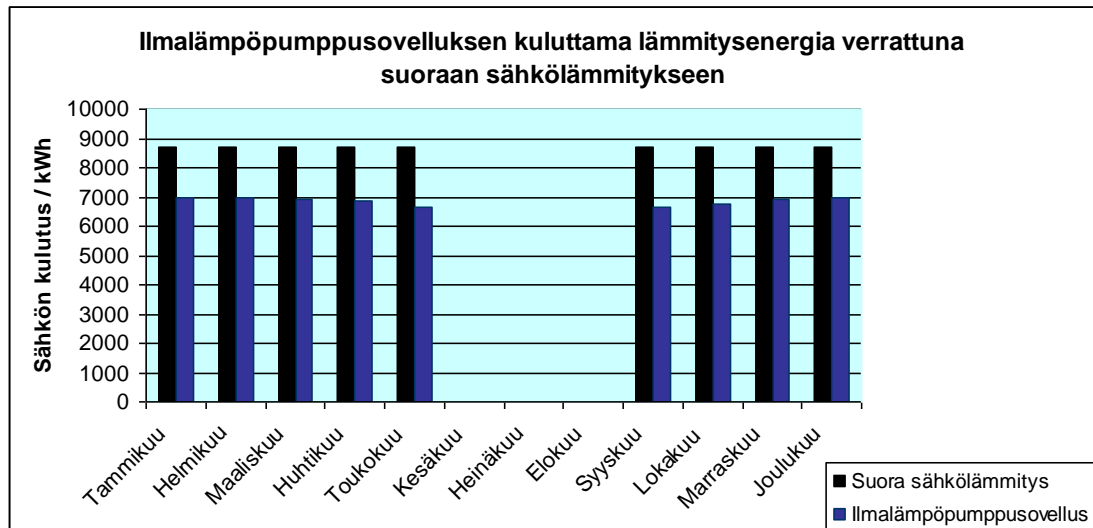
Kuvan 14 (ks. edell. s.) perusteella ilmalämpöpumppua ei tarvitse käyttää lämmitykseen kesäkuusta elokuuhun. Toukokuun COP-kertoimena käytetään 3,7 ja syyskuun COP-kertoimena 3,8 [7, s. 19]. Taulukossa 11 esitetään lasketut lämmitykseen kulu- neet energiamäärät kuukausittain, kun lämmitykseen käytetään ilmalämpöpumppua. Lisäksi taulukossa ilmoitetaan laskelmissa käytetyt COP-kertoimet ja ilmaisen energian osuus. Viiden työmaatilaryhmän keskimääräinen lämmitysenergian tarve kuukaudessa on 2 940 kWh.

Taulukko 11. Lämmitysenergian jakaantuminen kuukausitasolla

Kuukausi	COP-kerroin	Sähkön osuus / kWh	ilmaisen energian osuus / kWh
Tammikuu	2,6	1 117	1 823
Helmikuu	2,6	1 117	1 823
Maaliskuu	2,8	1 058	1 882
Huhtikuu	3,0	970	1 970
Toukokuu	3,7	794	2 146
Kesäkuu	-	-	-
Heinäkuu	-	-	-
Elokuu	-	-	-
Syyskuu	3,8	764	2 176
Lokakuu	3,3	882	2 058
Marraskuu	2,8	1 058	1 882
Joulukuu	2,7	1 088	1 852

Ryhmän loput sähköllä lämmitetyt työmaatilat lisäävät sähkön osuutta kuukaudessa keskimäärin 5 880 kWh:n verran. Kun loppujen tilojen keskimääräisen kulutuksen kuukaudessa lisää taulukon 11 sähkön osuuksiin, saadaan kuukausille keskimääräiset kokonaislämmityskulutukset.

Ilmalämpöpumppusovelluksen arvoja voidaan verrata suoran sähkölämmityksen kulutamiin kuukausikeskiarvoihin (kuva 15, ks. seur. s.), koska ilmalämpöpumppusovelluksen tulokset on saatu keskiarvoja käyttämällä. Ilmalämpöpumppusovelluksen keskiarvojen perusteella laskettujen lukujen vertaaminen suoraan taulukon 4 (ks. s. 16) arvoihin, antaa virheellisen kuvan. Taulukon 4 arvot muuttuvat paljon kuukausien välillä ja niihin muutoksiin vaikuttaa hetkelliset ulkolämpötilat.

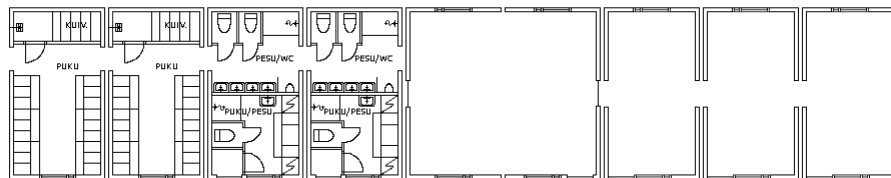


Kuva 15. Ilmalämpöpumppusovellus verrattuna suoraan sähkölämmitykseen

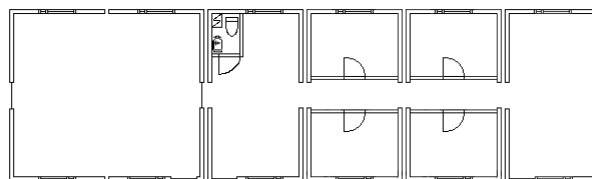
Ilmalämpöpumpun lämmityskäytöllä voidaan saada säästöä aikaan keskimäärin 1 957 kWh kuukaudessa yhdeksän kuukauden aikana. Säästön osuus keskimääräisestä lämmitysenergian kulutuksesta kuukaudessa on noin 22 %. Rahana säästöä syntyy yhdeksän kuukauden aikana noin 1 900 €. Kesällä jäähdytyskäytössä oleva ilmalämpöpumppu kuluttaa taas enemmän energiaa ja pienentää näin ollen vuodessa saatavaa säästön määrää.

Suunniteltaessa ilmalämpöpumppua työmaatiloihin, täytyy sisäyksikön sijaintiin kiinnittää huomiota. Työmaatilaryhmän muoto poikkeaa paljon normaalista pientalosta. Työmaatilat asennetaan peräkkäin pitkäksi riviksi, joka asettaa haastetta sisäyksikölle. (Kuva 16.)

1. Kerros



2. Kerros



Kuva 16. Työmaatilaryhmän pohjakuva

Kuvan 16 (ks. edell. s.) 2. kerroksessa sijaitsee työmaatoimisto. Kuten kuvasta huomaa, siellä on ollut asennettuna 6 työmaatilaa, jonka yhteispinta-ala on noin 110 m². Tämän tilan lämmitykseen käytetty ilmalämpöpumppu on hieman alimitoitettu.

Tehokkain asennuskohta yhdelle sisäyksikölle olisi puoleessa välissä työmaatoimistoa paikassa, josta sen levittämä lämmin ilma pääsee levittymään hyvin molempiin suuntiin. Mikäli asennettaisiin kaksi sisäyksikköä, saataisiin lämpö levittymään riittävän tasaisesti koko toimistoon, jos sisäyksiköt asennettaisiin molempiin päätyihin.

Oletuksena voidaan pitää, että 1 kW:a kohden ilmalämpöpumppu jäähdyttää tehokkaasti noin 15 m²:n alan. Tällöin yhdestä ilmalämpöpumpusta saadaan riittävä jäähdytysteho noin 45 m²:n alalle. Jäähdytyskäytössä oleva yksi ilmalämpöpumppu on näiden tietojen perusteella reilusti alimitoitettu kuuden työmaatilantehokkaaseen jäähdytykseen. Toisaalta kaksi ilmalämpöpumppua jäähdyttäisi riittävällä tasolla koko työmaatoimiston, mikäli ilma pääsee kunnolla virtaamaan tilassa.

Yhden ilmalämpöpumpun hinta asennuksineen on noin 1 500 €. Yhden vuoden lämmityskauden aikana saatava säästö sähköenergiassa riittäisi kattamaan ilmalämpöpumpun hankintakustannukset. Kahden ilmalämpöpumpun hankintakustannukset saataisiin säästettyä kahden lämmityskauden aikana.

Jäähdytyskäytössä ilmalämpöpumppu lisää sähkönkulutusta. Oletetaan, että yksi ilmalämpöpumppu jäähdyttää täydellä teholla 7 tuntia päivässä keskimäärin 21 päivän aikana kuukaudessa. Muuna aikana ilmalämpöpumppu ei ole päällä. Tällöin kuukaudessa jäähdytykseen kuluva energiamäärä on 382 kWh. Mikäli jäähdytykseen käytetään kahta ilmalämpöpumppua, on kuukauden keskimääräinen jäähdytykseen kuluva energiamäärä 764 kWh. Todellisuudessa jäähdytykseen kuluva teho 7 tunnin aikana on pienempi, koska pumppu ei jäähdytä kokoajan täydellä teholla.

Jäähdytyskuukausia on vuodessa kolme, jolloin kokonaisuudessaan jäähdytyskulutus täydellä teholla kesän aikana yhdellä pumpulla on 1 146 kWh ja kahdella pumpulla 2 292 kWh. Yhdellä pumpulla kuukauden jäähdytyksen kustannus on noin 41 € ja kahdella pumpulla noin 82 €. Jäähdytyskauden kustannus yhdellä pumpulla on noin 124 € ja kahdella pumpulla noin 248 €.

Lukujen perusteella voidaan todeta, että jäähdytyskäyttö ei olennaisesti pienennä lämmityksestä saatuja säästöjä. Kuukaudessa kuluva yhden pumpun jäähdytysenergiamäärä on noin 20 % lämmityskäytössä kuukaudessa saadusta säästöstä. Täytyy muistaa, että jäähdytyskausi kestää noin 3 kuukautta ja lämmityskausi noin 9 kuukautta.

7 Aurinkosähköpaneelien laskennallinen malli

7.1 Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus

Aurinkosähköjärjestelmät voidaan asentaa kytkettyinä sähköverkkoon tai omavaraisena järjestelmänä. Sähköverkkoon kytkettynä aurinkoenergiaa voidaan käyttää lisäenergiana ja niiden tuottama ylimääräinen sähköenergia voidaan syöttää verkkoon siihen tarkoitetun vaihtosuuntaajan avulla. Omavarainen järjestelmä on tarkoitettu tuottamaan käyttökohteeseen sen tarvitsema energiamäärä ja sen tuottama ylimääräinen energia voidaan varastoina akkuihin. Omavaraisessa järjestelmässä ei ole mahdollisuutta ottaa energiaa verkosta, joten tarvittava energia on tuotettava aurinkopaneeleilla tai käytettävä apulaitetta lisäenergian syöttöön.

Aurinkoenergiaa voidaan hyödyntää joko suoraa tasasähkönä asentamalla ryhmään tasasähköllä toimivia laitteita, kuten valaisimia tai muuttamalla vaihtosuuntaajan avulla aurinkopaneelien tuottama tasasähkö vaihtosähköksi. Tästä aiheutuu kuitenkin häviöitä, joten tasasähkökäytöllä saadaan hyödynnettyä enemmän tuotetusta energiasta.

Omavaraisen aurinkosähköjärjestelmän soveltuvuuteen ja mitoitukseen vaikuttaa muun muassa kulutuksen suuruus, kulutuksen ajankohta ja sijainti. Lisäksi on asetettava vaatimukset halutulle toimintavarmuudelle. Kulutuksen suuruuteen vaikuttaa syötettävien laitteiden kokonaisteho ja käyttöaika. Kulutuksen jakauma vaikuttaa järjestelmän mitoituksessa tarvittavan akuston kokoon. Lisäksi vuodenajat vaikuttavat paneeleista saatavaan energiamäärään. Huhtikuu - syyskuu on Suomessa suotuisin ajanjakso aurinkosähköön tuotannolle, kun taas marras - tammikuussa aurinkosähköön tuotanto on paljon vähäisempää.

Aurinkosähköjärjestelmän mitoituksessa määritetään sille myös omavaraisuusaika; aika jolloin sen on tultava toimeen ainoastaan akun varassa. Omavaraisuusaika vaikuttaa hankittavan akuston kokoon.

Auringonsäteily vaihtelee sijoituspaikkojen välillä. Se on keskeinen tekijä tarvittavan energiamäärän saamiseksi. Mitoitusta tehtäessä täytyy arvioida säteilyn saatavuus esimerkiksi järjestelmää lähinnä olevan säteilymittausaseman mittaamien tietojen perusteella. Hyväksyttävä toimintavarmuus riippuu aurinkosähköllä syötetystä järjestelmästä. Esimerkiksi kesämökillä on yleensä hyväksyttävää, että järjestelmällä ei saada muutamaa käyttöpäivänä tuotettua haluttua energiaa, mutta toimistokäytössä tilanne on eri.

Aurinkopaneelit on tärkeintä sijoittaa paikkaan, johon tulee eniten auringonvaloa. Sijoituksessa huomioidaan esimerkiksi lähellä olevat rakennukset ja puut, ettei mikään osa paneelista jää varjoon. Lisäksi mitoitukseen vaikuttaa myös aurinkopaneelien suuntaus ja asennuskulma. Aurinkopaneelit suunnataan pääsääntöisesti kohti etelää. Vakiokulmaan asennetut aurinkopaneelit kallistetaan yleensä niin, että saadaan maksimoitua vuotuinen sähköntuotto yhdellä paneelin asennolla. Kun aurinkopaneelien kulmaa on mahdollista muuttaa vuoden aikana, saadaan niistä paras sähköntuotto. Työmaatilakäytössä vakiokulma-asennus on helpompi ratkaisu. [16, s. 144–150.]

7.2 Aurinkosähköjärjestelmän sähkön tuotto

Aurinkosähköpaneelin määritellään yleensä tuottavan nimellistehonsa, kun säteilyn intensiteetti on 1 kWh/m^2 , joka vastaa yhtä niin sanottua huippupaistatuntia. Paneeliston enimmäisaurinkosähkön tuotto saadaan tällöin yhtälöllä:

$$E_{pv} = P_{pv} \cdot t_k, \quad (4)$$

missä P_{pv} on paneeliston nimellisteho ja t_k on ajanjakson huippupaistatunnit.

Aurinkopaneeleita testanneelle työmaalle asennettiin kaksi aurinkosähköjärjestelmää. Yksi järjestelmä koostuu nimellisteholtaan 160 Wp:n aurinkopaneelista, jonka latausvirta on 9,2 A, kahdesta 250 Ah:n akusta, ja säätimestä, jonka nimellislatausvirta on 20 A. Järjestelmän jännite on 12 V. Paneelille valittiin kallistuskulmaksi 45° , koska sillä saadaan maksimoitua yhdellä paneelin asennolla vuotuinen sähköntuotto. Säädin

valitaan niin, että sen nimellislatausvirta on kaksi kertaa suurempi kuin aurinkopaneelin. Akut on kytketty rinnan, jolloin akuston koko on yhteensä 500 Ah.

Taulukossa 12 ilmoitetaan kuukausitasolla auringonsäteilyn keskimääräiset intensiteetit vuorokaudessa Helsingissä, kun paneelien kallistuskulma on 45°. Säteilytehon määrä muuttuu kallistuskulman muuttuessa. Kesäaikana paras sähköntuotto saadaan kallistuskulman ollessa 30° ja talviaikaan paras sähköntuotto saadaan kallistuskulman ollessa 75–90°.

Taulukko 12. Keskimääräinen auringonsäteily Helsingissä kallistuskulmalla 45 °

Ajanjakso	Säteily kWh/m ² , vrk
Tammikuu	0,47
Helmikuu	1,75
Maaliskuu	3,37
Huhtikuu	4,46
Toukokuu	5,69
Kesäkuu	6,27
Heinäkuu	5,49
Elokuu	5,04
Syyskuu	3,52
Lokakuu	1,83
Marraskuu	0,53
Joulukuu	0,47

Taulukon 12 ja yhtälön 4 (ks. edell. s.) perusteella saadaan laskettua paneelin enimmäissähkön tuotto.

Aurinkosähköjärjestelmässä kuitenkin syntyy häviöitä, jotka otetaan huomioon järjestelmän paneelin nimellistehoa määritettäessä. Häviöitä aiheutuu muun muassa johdotuksista, säätimestä ja energian varastoimisesta akkuihin. Lisäksi paneelin hyötysuhde on yleensä huono. Aurinkosähköjärjestelmän kaikkien häviöiden vaikutusta kuvataan järjestelmähyötysuhteella, joka on yleensä 50–80 %. Tarvittavan paneeliston nimellisteho saadaan laskettua yhtälöllä:

$$P_{pv} = \frac{E_{kuorma}}{n_{sys} \cdot t_k}, \quad (5)$$

missä E_{kuorma} on päivittäisen kulutuksen tarvitsema energiamäärä ja n_{sys} järjestelmähyötysuhde. Yhtälöstä 5 saadaan laskettua järjestelmästä saatava energiamäärä vuorokautta kohden, kun tiedetään paneelin nimellisteho, järjestelmähyötysuhde ja huipputaistutunnit (yhtälö 6, ks. seur. s.).

$$E_{kuorma} = P_{pv} \cdot n_{sys} \cdot t_k \quad (6)$$

Oletetaan, että järjestelmähyötysuhde on 70 %. Taulukossa 13 ilmoitetaan aurinkopaneelin enimmäissähköntuotto E_{pv} sekä järjestelmästä saatava energiamäärä E_{kuorma} .

Taulukko 13. Aurinkopaneelin enimmäissähkön tuotto ja enimmäiskuormat

Ajanjakso	E_{pv} / Wh , vrk	E_{kuorma} / Wh , vrk
Tammikuu	75	52
helmikuu	280	196
Maaliskuu	539	377
Huhtikuu	713	499
Toukokuu	910	637
Kesäkuu	1 003	702
Heinäkuu	878	614
Elokuu	806	564
Syyskuu	563	394
Lokakuu	292	204
Marraskuu	84	59
Joulukuu	75	52

Mikäli järjestelmähyötysuhde on oletettua arvoa suurempi, saadaan enemmän sähkötehoa ja vastaavasti sen ollessa pienempi, saadaan vähemmän sähkötehoa. Taulukon 13 luvuista nähdään, että kesäaikana aurinkopaneeleista saatava sähköenergia on huomattavasti suurempi kuin talviaikana. Mikäli järjestelmältä halutaan hyvä toimintavarmuus, täytyy kuormitusenergiamääränä käyttää alhaisinta taulukkoon 13 laskettua arvoa.

Työmaatilaryhmän aurinkosähköjärjestelmäkokeilussa yleisvalaistukseksi työmaatiloihin asennettiin led-valaisimet, joiden teho oli 50 W. Lisäksi valaistusta ohjattiin liiketunnistimella, joiden avulla tilan turha valaiseminen saadaan minimoitua. (Kuva 17.)



Kuva 17. Led-valaisin liiketunnistimella

Taulukon 13 (ks. edell. s.) arvojen perusteella voidaan todeta, että järjestelmän tuottama energiamäärä riittäisi tammikuussa ja joulukuussa yhden valaisimen käyttöön tunnin ajaksi. Parhaimmillaan eli kesäkuussa, järjestelmästä saatava teho riittäisi yhden valaisimen käyttöön 14 tunnin ajaksi. Järjestelmä kannattaa asentaa sellaisten tilojen valaistuksen syöttöön, joissa valaistus on käytössä vähiten vuorokauden aikana.

Esimerkiksi työntekijöiden taukotilaan asennettiin 3 led-valaisinta, joiden yhteisteho on 150 W, ja niiden ohjaus toteutettiin liiketunnistimella. Liitäntälaitteiden häviöitä ei tässä oteta huomioon. Oletetaan, että valaistus on päällä vuorokaudessa 2 tuntia. Näin ollen tilan valaistus kuluttaa energiaa 300 Wh vuorokaudessa. Aurinkosähköjärjestelmällä saadaan valaistus toteutettua maaliskuusta syyskuuhun. Muuna aikana valaistus tarvitsee sähköä verkosta.

Aurinkosähköjärjestelmän akustoon saadaan varastoitua energiaa silloin, kun paneelien tuottama energia ei kulu laitteiden käytössä. Akuston avulla saadaan energiaa syötettyä kulutuslaitteille myös muulloin kuin auringon paisteella. Täyteen ladatuista akuista, joiden kapasiteetti on yhteensä 500 Ah, saadaan 6 kWh:n energiamäärä. Käytännössä akut voivat latautua enimmilleen kesäkauden aikana, jolloin aurinkotunteja on eniten kulutukseen nähden. Talvella auringosta saatava energia ei riitä lataamaan akkuja riittävästi esimerkiksi viikonlopun aikana.

Luvussa 4.3 määritetyn hinnan ja taulukon 13 (ks. s. 33) perusteella säästöä saadaan tammikuussa ja joulukuussa enimmillään noin 0,6 snt vuorokaudessa ja noin 17 snt kuukaudessa. Kesäkuussa säästöä saadaan enimmillään noin 7,6 snt vuorokaudessa ja noin 2,3 € kuukaudessa.

Työmaatilakäyttöön tarvitaan enemmän aurinkopaneeleita kuin yksi, jotta tarvittava energia esimerkiksi valaistukseen saataisiin tuotettua ympäri vuoden. Toisaalta vapaa-ajan käyttöön aurinkosähköjärjestelmä sopii mainiosti, koska kulutuksen määrä on pienempi kuin työmaatiloissa, ja kulutus yleensä painottuu kesään.

Aurinkosähköjärjestelmä voidaan mitoittaa myös muille kulutuslaitteille, esimerkiksi jääkaapille, kahvinkeitinille ja mikroaaltouunille. Liitteessä 4 esitetään erilaisten tasa- ja vaihtosähköllä toimivien kulutuslaitteiden tehoja. [16, s. 151–154.]

8 Yhteenveto

Työmaatilat kuluttavat lämmitykseen pinta-alaan nähden paljon sähköä. Sähkölämmitteisen 120 m²:n pientalon lämmitykseen kuluva vuotuinen sähkömäärä on 22 % pienempi kuin 18 m²:n työmaatilán lämmitykseen kuluva vuotuinen sähkömäärä. Yhden työmaatilán lämmitysteho neliötä kohden on yli viisinkertainen 120 m²:n pientaloon nähden.

Lämmöneristevertailun paras työmaatila oli polyuretaanieristeinen. Yrityksellä käytössä olevien työmaatilojen ero eristevertailussa oli noin 13 %. Mineraalivillaeristeinen työmaatila eli vertailutila A kuluttaa lämmitykseen noin 13 % enemmän sähköä kuin polyuretaanieristeinen työmaatila eli vertailutila B.

Ilmalämpöpumpun todettiin säästävän energiaa työmaatilakäytössä. Työmaatilaryhmän lämmitykseen kuluvasta sähköstä saadaan säästettyä ilmalämpöpumpun avulla noin 17 %. Jäähdytykseen kuluvan sähkön osuus säästetystä sähköstä on alle 7 % jäähdytyskäytölle tehtyjen oletusten perusteella.

Työmaatilakäytössä aurinkosähköjärjestelmän toimintavarmuuden tulee olla melko korkea, jolloin järjestelmältä vaaditaan enemmän kuin esimerkiksi kesämökkikäytössä. Aurinkosähköjärjestelmä työmaatilakäytössä tulee olla sellainen, että sähköä voidaan ottaa verkosta silloin, kun paneelit eivät kykene tuottamaan tarvittavaa tehoa.

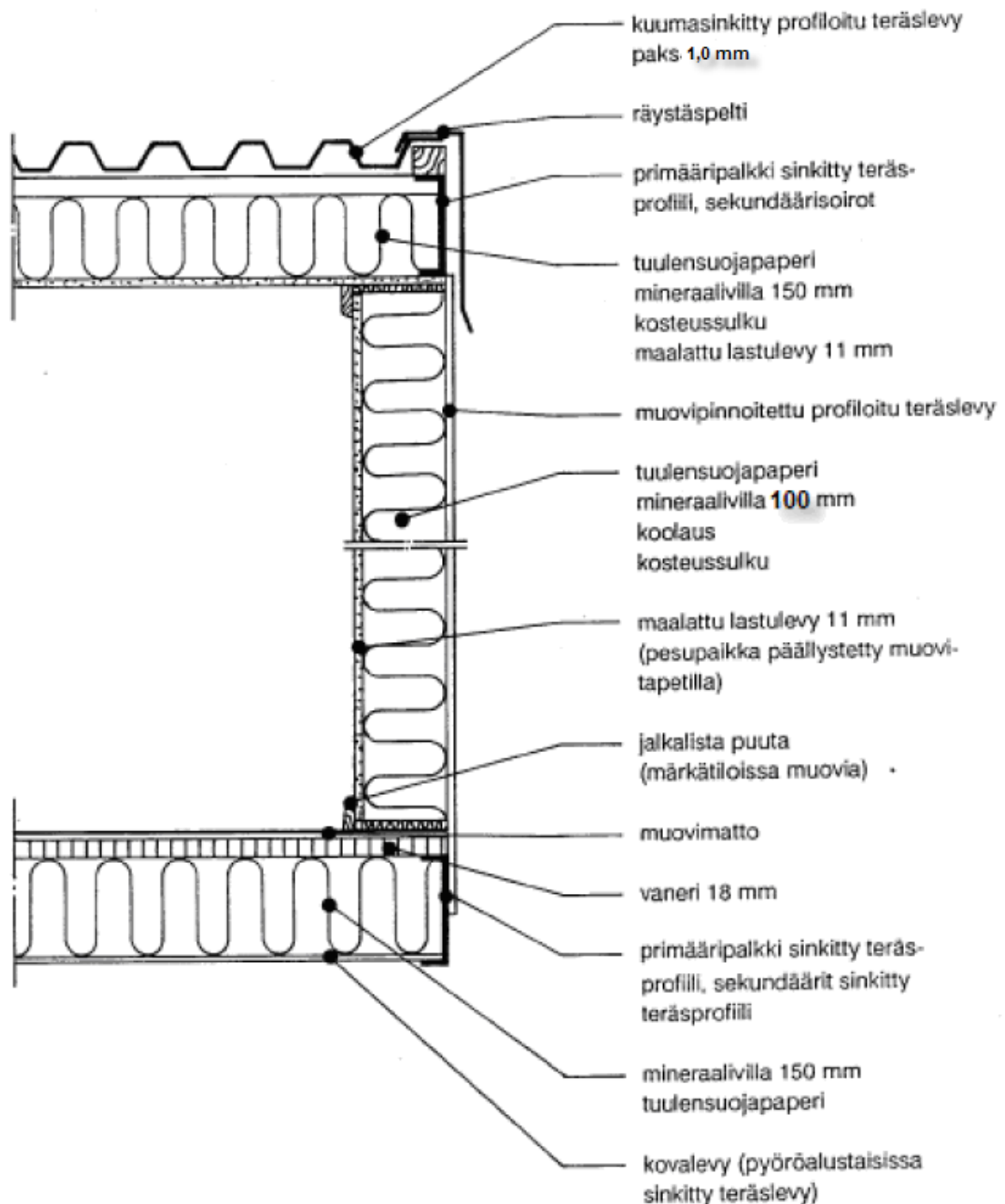
Laskennallisen aurinkosähköjärjestelmän tuottama säästö sähköenergiassa, kun hankintakustannuksia ei oteta huomioon, on hyvin pieni. Kun verrataan hankintakustannuksia saataviin säästöihin sähkönkulutuksessa, järjestelmän takaisinmaksuajaksi tulee useampi vuosi. Säästöä haluttaessa, järjestelmää ei kannata asentaa työmaatilakäyttöön.

9 Lähteet

- 1 Rakennustyömaan aluesuunnittelu. 2007. Suunnitteluohje C2-0299. Rakennustieto.
- 2 Suvanto, Kari. 2005. Tekniikan fysiikka 1. Helsinki: Edita.
- 3 Lämmöneristys ohjeet 2003. 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 4 Mineraalivillaeristeet. 1999. Ohjetiedosto RT 36-10689. Rakennustieto.
- 5 Siikanen, Unto. 2001. Rakennusaineoppi. Helsinki: Rakennustieto.
- 6 Björkholtz, Dick. 1997. Lämpö ja kosteus. Helsinki: Rakennustieto.
- 7 Tuunanen, Jussi. 2009. Pientalojen ilmalämpöpumput sähköverkossa. Kandidaatin työ. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- 8 Ilmalämpöpumppu. Verkkodokumentti. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Ilmal%C3%A4mp%C3%B6pumppu>. Luettu 10.4.2011.
- 9 Suvanto, Kari. Laajalehto, Kari. 2006. Tekniikan fysiikka 2. Helsinki: Edita.
- 10 Vuositilasto 2009. 2010. Verkkodokumentti. <http://ilmatieteenlaitos.fi/530>. Luettu 15.4.2011.
- 11 Vuositilasto 2010. 2011. Verkkodokumentti. <http://ilmatieteenlaitos.fi/828>. Luettu 15.4.2011.
- 12 Sähkön hinnan kehitys 1.4.2011. Verkkodokumentti. www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=2464&pgid=67&languageid=246. Luettu 22.4.2011.
- 13 Suosituin kokoluokka, suuria eroja. 2009. Lehtikirjoitus. TM Rakennusmaailma 5E/2009.
- 14 Lämpöpumppujärjestelmän suunnittelu. Verkkodokumentti. www.sulpu.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=119. Luettu 8.4.2011.
- 15 Ilmastollinen vertailukausi 1971-2000. Verkkodokumentti. <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmastollinen-vertailukausi-1971-2000>. Luettu 17.4.2011.
- 16 Erat Bruno, Erkkilä Vesa, Nyman Christer, Peippo Kimmo, Peltola Seppo, Suokivi Hannu. 2008. Aurinko-opas. Porvoo: Painoyhtymä Oy.

Työmaatilojen rakenteet

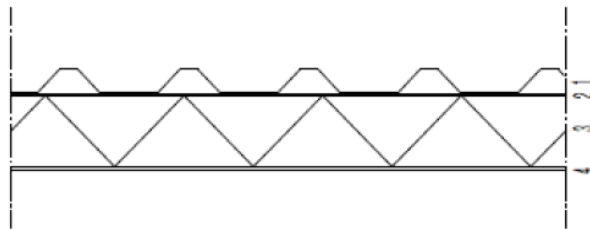
Vertailutila A:



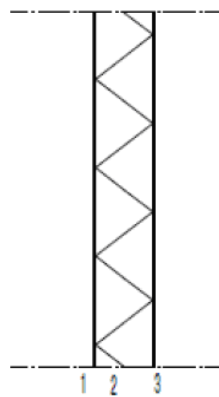
Vertailutila B:

Katto:

- 1 Vesikate 0,9 mm
- 2 Kovalevy 3.2 mm
- 3 Puurunko + Polyuretaani 123 mm
- 4 Maalattu Mdf-levy 6 mm

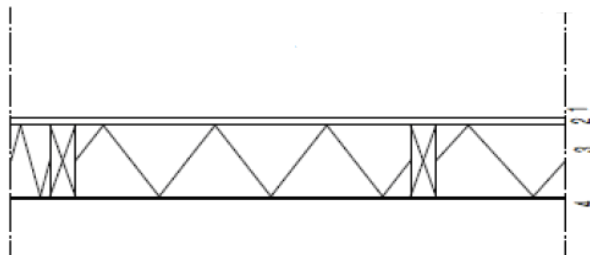


Seinät:



- 1 Koreavaneri 5.2 mm
- 2 Puurunko + Polyuretaani 95 mm
- 3 Matalaprofiilipelti 0,9 mm

Lattia:



- 1 Muovimatto
- 2 Havuvaneri 12 mm
- 3 Puurunko + Polyuretaani 123 mm
- 4 Kovalevy 3.2 mm

Vertailutilojen U-arvojen laskenta

Taulukossa 1 esitetään laskelmissa käytetyt aineiden normaaliset lämmönjohtavuusarvot.

Taulukko 1. Aineiden normaaliset lämmönjohtavuudet

Aine	$\lambda_n / \text{W}/(\text{m K})$
1. Teräslevy	50
2. Mineraalivilla	0,055
3. Lastulevy	0,14
4. Muovimatto PVC	0,14
5. Kovalevy	0,13
6. Polyuretaani	0,030
7. Mdf-levy	0,11
8. Koreavaneri	0,13
9. Havuvaneri	0,13

Vertailutila A

Katossa ja sienissä on ilmvälit. Lisäksi ne ovat hyvin tuulettuvia, joten teräslevyn lämmönvastusta ei lasketa. Ohjeiden mukaan lisätään sisäpuolen lämmönvastusarvo. Lattiassa ei ole ilmväliä, joten teräslevy otetaan laskuihin mukaan. Ohut ainekerros R_{q1} on tuulensuojapaperi ja R_{q2} on kosteussulku.

Katon lämmönvastus on

$$\begin{aligned}
 R_{TA,katto} &= R_{si} + R_2 + R_3 + R_{hyvin\ tuul.} + R_{q1} + R_{q2} = R_{si} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_{hyvin\ tuul.} + R_{q1} + R_{q2} \\
 &= 0,10 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + \frac{0,15 \text{ m}}{0,055 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,011 \text{ m}}{0,14 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + 0,10 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + 0,02 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + 0,02 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} \\
 &= 3,0458 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}.
 \end{aligned}$$

Katon lämmönläpäisykerroin on

$$U_{A,katto} = \frac{1}{R_{TA,katto}} = \frac{1}{3,0458 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}} = 0,3283 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}.$$

Seinän lämmönvastus on

$$\begin{aligned} R_{TA,seinä} &= R_{si} + R_2 + R_3 + R_{hyvin\ tuul.} + R_{q1} + R_{q2} = R_{si} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_{hyvin\ tuul.} + R_{q1} + R_{q2} \\ &= 0,13 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + \frac{0,10 \text{ m}}{0,055 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,011 \text{ m}}{0,14 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + 0,13 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + 0,02 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + 0,02 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} \\ &= 2,1968 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}. \end{aligned}$$

Seinän lämmönläpäisykerroin on

$$U_{A,seinä} = \frac{1}{R_{TA,seinä}} = \frac{1}{2,1968 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}} = 0,4552 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}.$$

Lattian lämmönvastus on

$$\begin{aligned} R_{TA,lattia} &= R_{si} + R_4 + R_2 + R_1 + R_{q1} + R_{se} = R_{si} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_1}{\lambda_1} + R_{q1} + R_{se} \\ &= 0,17 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + \frac{0,0015 \text{ m}}{0,14 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,15 \text{ m}}{0,055 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,001 \text{ m}}{50 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + 0,02 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + 0,04 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} \\ &= 2,9680 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}. \end{aligned}$$

Lattian lämmönläpäisykerroin on

$$U_{A,lattia} = \frac{1}{R_{TA,lattia}} = \frac{1}{2,9680 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}} = 0,3369 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}.$$

Vertailutila B

Katon lämmönvastus on

$$\begin{aligned}
 R_{TB,katto} &= R_{si} + R_1 + R_5 + R_6 + R_7 + R_{se} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_5}{\lambda_5} + \frac{d_6}{\lambda_6} + \frac{d_7}{\lambda_7} + R_{se} \\
 &= 0,10 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + \frac{0,0009 \text{ m}}{50 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,0032 \text{ m}}{0,13 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,123 \text{ m}}{0,030 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,006 \text{ m}}{0,11 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + 0,04 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} \\
 &= 4,3192 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}.
 \end{aligned}$$

Katon lämmönläpäisykerroin on

$$U_{B,katto} = \frac{1}{R_{TB,katto}} = \frac{1}{4,3192 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}} = 0,2315 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}.$$

Seinän lämmönvastus on

$$\begin{aligned}
 R_{TB,seinä} &= R_{si} + R_8 + R_6 + R_1 + R_{se} = R_{si} + \frac{d_8}{\lambda_8} + \frac{d_6}{\lambda_6} + \frac{d_1}{\lambda_1} + R_{se} \\
 &= 0,13 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + \frac{0,0052 \text{ m}}{0,13 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,095 \text{ m}}{0,030 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,0005 \text{ m}}{50 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + 0,04 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} \\
 &= 3,3767 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}.
 \end{aligned}$$

Seinän lämmönläpäisykerroin on

$$U_{B,seinä} = \frac{1}{R_{TB,seinä}} = \frac{1}{3,3767 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}} = 0,2961 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}.$$

Lattian lämmönvastus on

$$\begin{aligned}
 R_{TB,lattia} &= R_{si} + R_4 + R_9 + R_6 + R_5 + R_{se} = R_{si} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_9}{\lambda_9} + \frac{d_6}{\lambda_6} + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{se} \\
 &= 0,17 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + \frac{0,0015 \text{ m}}{0,14 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,012 \text{ m}}{0,13 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,123 \text{ m}}{0,030 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,0032 \text{ m}}{0,13 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + 0,04 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} \\
 &= 4,4376 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}.
 \end{aligned}$$

Lattian lämmönläpäisykerroin on

$$U_{B,lattia} = \frac{1}{R_{TB,lattia}} = \frac{1}{4,4376 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}} = 0,2254 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}.$$

Ilmalämpöpumpun tekniset tiedot

Zibro S1825S

Jäähdytyskapasiteetti (enintään) *	W	2 600
EE-luokka*		A
EER*		3,7
Lämmityskapasiteetti (enintään) *	W	3 000
Lämmitysteho		A
COP*		4
Kosteudenpoistokapasiteetti **	l / 24 h	19
Virrankulutus jäähdytystoiminnossa	kW	0,7
Virrankulutus lämmitystoiminnossa	kW	0,75
Virransyöttö	V/Hz/Ph	230 / 50 / 1
Virta (nim.) jäähdytys/lämmitys	A	2,9 / 3,0
Suurin virta	A	8
Ilmanvirtaus **	m³/h	650 / 515 / 375
Huoneen koko enintään **	m³	65 - 90
Kompressorin tyyppi		Pyörivä
Puhaltimen nopeus		3
Lämpötilansäätimen alue	°C	17 - 30
Toiminta-alue	°C	10 - 40
Käyttö manuaalisesti/mekaanisesti/elektronisesti		Elektroninen kaukosäädin
Kaukosäädin, kyllä/ei		K
Ilmansuodatintyyppi (-tyypit)		Seula, Plasma, aktiivihiili
Kylmäaineen tyyppi / täyttömäärä	g	R410A / 1230 g
Kylmäaineputken halkaisija, neste – kaasu	mm	6,35 / 9,53
Paine, imu/poisto	bar	<15 / <42
Sisäyksikön mitat (l x k x s)	mm	815 x 280 x 215
Ulkoyksikön mitat (l x k x s)	mm	760 x 590 x 285
Sisäyksikön nettopaino	kg	10
Ulkoyksikön nettopaino	kg	42
Sisäyksikön bruttopaino	kg	12
Ulkoyksikön bruttopaino	kg	45
Sisäyksikön äänenpainetaso	dB(A)	30 - 41
Ulkoyksikön äänenpainetaso	dB(A)	52
Sisäyksikön suojaus	IP	IP X0
Ulkoyksikön suojaus	IP	IP X4
Sulake		T3, 15A / 250V

Kulutuslaitteiden tehoja

Tasasähkö		Vaihtosähkö	
Laite	Teho / W	Laite	Teho / W
Yleisvalaisin	10 - 20	Valaisin (hehkulamppu)	40 - 60
Lukuvalo	5 - 10	Valaisin (loisteputki)	10
Tuuletin (15 cm)	20	Stereolaitteet	50
Väritelevisio	40 - 60	Televisio	70
Matkaradio	1 - 5	Pölynimuri	1 000
CD-soitin	5 - 20	Hiustenkuivaaja	800
Jääkaappi	10 - 100	Jääkaappi (180 l)	100
		Kahvinkeitin	800
		Leivänpaahdin	1 000

